

2 Ej. No. 52



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

FACULTAD DE QUIMICA

T E S I S

CONSERVACION DE LA ENERGIA EN

LA PRODUCCION DE CLINKER

RAUL JOVER GARCIA

INGENIERO QUIMICO

MEXICO, D.F.

1984



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

SUMARIO

INTRODUCCION

HISTORIA DEL CEMENTO

CAPITULO I El clínker

CAPITULO II Proceso de clinkerización

CAPITULO III Combustión, flamas y quemadores

CAPITULO IV Balances térmicos

CAPITULO V Conservación de la energía calorífica

CAPITULO VI Costos

ANALISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

INDICE

INTRODUCCION

Dentro de la diversidad de los procesos industriales -- que actualmente existen, destaca por su importancia en la -- actividad económica y social, la industria del cemento. En México el incremento en la demanda constante en los energé-- ticos ha obligado a la industria del cemento a racionalizar al máximo sus procesos para ahorrar la energía.

Es por esta causa que se pretende en esta tesis dar -- los conocimientos y medios necesarios para obtener un clín-- ker de alta calidad al más eficiente proceso térmico.

Esta tesis está dividida en seis capítulos, en donde, en el primer capítulo se da una explicación general de las materias primas que constituyen al cemento portland así co-- mo también al clínker. También se encuentran aquí, las ba-- ses químicas necesarias para transformar dichas materias -- primas a clínker y en modo especial, se hace hincapié a las dos reacciones más importantes durante el proceso de clín-- kerización.

En el segundo capítulo titulado proceso de clinkeriza-- ción indica todo aquello necesario para llevar a cabo opera-- cionalmente las bases dadas en el primer capítulo, para la obtención de clínker a la más alta calidad. Así como tam-- bién se dan los fundamentos primordiales para obtener el -- clínker bajo un proceso eficiente.

Para poder llegar a la finalidad del título de esta te-- sis, se da en el tercer capítulo, la teoría básica de la -- combustión, flamas y quemadores, en un aspecto teórico y -- práctico, con el fin de obtener un proceso térmico eficiente, sin olvidar la calidad del producto.

En el capítulo cuarto se describen los principios so--

bre la transferencia de calor y mecanismos en el proceso de clinkerización. Y en donde se expone un ejemplo de balance térmico, para poder calificar la eficiencia térmica del proceso en forma global o parcial.

En el capítulo quinto se hace un análisis cualitativo de los diferentes factores que intervienen en el consumo y ahorro de energía. Entre estos factores destacan: composición química, régimen de transferencia de calor, tipo de procesos, etcétera. También se mencionan las propiedades de los combustibles que pueden ser usados en el proceso de clinkerización.

En capítulo sexto se refiere a los costos de producción en el proceso de clinkerización, referidos al año de 1983.

HISTORIA DEL CEMENTO

El uso de materiales de cementación es muy antiguo. Los egipcios ya utilizaban el yeso calcinado impuro, los griegos y los romanos empleaban caliza calcinada y posteriormente, - aprendieron a mezclar cal con agua, arena y piedra tritura-- das o ladrillo y tejas quebradas. Esto es el primer concreto de la historia. Un mortero de cal no endurece con el agua y, para la construcción con agua, los romanos mezclaban cal con ceniza volcánica o con tejas de arcilla quemada finamente - trituradas. La sílice activa y la alúmina que se encuentran en las cenizas y en las tejas se combinan con la cal para -- producir lo que fue conocido como cemento puzolánico, prove-- niente del pueblo Pozzuoli, cerca de Vesubio, donde se encon-- traron por primera vez esas cenizas volcánicas. El nombre de cemento puzolánico se utiliza hasta nuestros días para des-- cribir cementos obtenidos simplemente de moler materiales na-- turales a temperatura normal. Algunas de las estructuras ro-- manas en las cuales la mampostería se unía con morteros, ta-- les como el Coliseo de Roma y el "Pont de Gard", cerca de Ni-- mes, que han sobrevivido hasta esta época con su material de cementación aún duro y firme. En las ruinas de Pompeya, a me-- nudo el mortero se encuentra menos dañado por la intemperie que la piedra blanca.

En la edad media hubo una disminución general de la ca-- lidad y el uso del cemento, y solamente en el siglo XVIII -- se encuentra un adelanto en el conocimiento de los cementos. En 1756 John Smeaton fue comisionado para reconstruir el fa-- ro de Eddyston en la costa de Carnwall, y encontró que el me-- jor mortero se obtenía cuando se mezclaban "puzolana" con ca-- liza que contenía una alta cantidad de material arcilloso. - Al reconocer el papel de la arcilla, que hasta entonces se -- consideraba indeseable, Smeaton fue el primero en conocer -- las propiedades químicas de la cal hidráulica.

A partir de ésto, se desarrollaron otros tipos de ce-
mentos hidráulicos, como el "cemento romano" que obtuvo Joseph
Parker por calcinación de nódulos de caliza arcillosa, que -
vinieron a culminar en la patente del "cemento portland", e-
fectuada en 1824 por Joseph Aspidin, un constructor de Leeds.
Este cemento se preparaba calentando una mezcla de arcilla -
finamente triturada y caliza dura en un horno, hasta elimi--
nar el CO_2 ; esta temperatura era mucho más baja que la nece-
saria para la formación de clínker.

Por clínker se entiende el producto que se obtiene de -
la calcinación de las materias primas, caliza más arcilla, a
una temperatura de entre 1300 y 1400°C, y que es la base pa-
ra la formación del cemento portland. Se empleará este termi-
no aún cuando no es castellano, por su uso común en la indus-
tria del cemento.

El prototipo del cemento moderno fue obtenido en 1845 -
por Isaac Johnson, quien quemó una mezcla de arcilla y cali-
za hasta la formación de un compuesto fuertemente cementoso.

El nombre de cemento portland, fue concebido original--
mente debido a la semejanza de color y calidad entre el ce-
mento fraguado y la piedra de Portland, una caliza obtenida
en una cantera de Dorsett y se ha conservado hasta nuestros
días para describir un cemento obtenido de la mezcla minucio-
sa de materiales calcáreos y arcillosos y otros materiales -
que contienen sílice, alúmina u óxidos de fierro, quemando--
los a una temperatura de formación de clínker.

EL CLINKER

I.- ABUNDANCIA EN LA CORTEZA TERRESTRE DE LOS ELEMENTOS MAS IMPORTANTES QUE CONSTITUYEN AL CEMENTO PORTLAND.

1.- Todas las sustancias que se encuentran en la naturaleza, esto es, aquéllas que integran la litósfera, la hidrósfera y la atmósfera de nuestro planeta están constituidas -- por las combinaciones que entre sí forman noventa y dos tipos de átomos o elementos químicos, los cuales, según la clásica definición de Robert Boyle, son el límite práctico del análisis químico.

Después de los minuciosos análisis y cálculos efectuados por los geoquímicos Frank W. Clarke, e Ida y Walter Noddak se ha llegado a la conclusión de que refiriéndose a una costra de la superficie terrestre de dieciseis kilómetros de profundidad supuesta de composición uniforme, el oxígeno --- constituye casi la mitad y el silicio una cuarta parte de la misma; y de aquí que si se considera en orden decreciente según la abundancia el aluminio, el hierro, el calcio, el sodio, el potasio y el magnesio, es decir, un total de ocho elementos, proporcionan una suma equivalente a 97.6% en dicha costra, quedando solamente un 2.4% para completar la distribución con los ochenta y cuatro elementos químicos restantes.

2.- Los recursos naturales, rocas y minerales, donde se encuentran en mayor abundancia los ocho elementos mencionados son los siguientes:

Oxígeno: elemento extraordinariamente difundido en la naturaleza, constituyente de casi todas las rocas y minerales.

Silicio: cuarzo, feldespatos, mica, caolín, arenas, arcillas, pizarras y todos los silicatos.

Aluminio: bauxita, corindón, esmeril, caolín, mica, arcillas, pizarras, feldespato y todos los aluminosilicatos.

- Hierro: limonita, hematita, magnetita, arcillas o margas ferruginosas y como silicatos en casi todas las rocas que no sean blancas.
- Calcio: caliza, mármol, creta, calcita, aragonita (todos ellos son carbonatos), dolomita (junto con el -- carbonato de magnesio) y yeso (sulfato de calcio dihidratado).
- Sodio: cloruro, nitrato, sulfato, carbonato y silicato sódicos.
- Potasio: cloruro, nitrato, sulfato o silicatos potásicos en feldespatos, mica y leucita.
- Magnesio: magnesita (Carbonato magnésico), dolomita (junto con el carbonato cálcico), cloruro y sulfato --- magnésico.

3.- Ahora bien, cualitativamente los ocho primeros elementos que en orden de abundancia decreciente se encuentran en la corteza terrestre, constituyen también más del 97% del producto artificial llamado cemento portland, lo cual es lógico puesto que dichos elementos además de ser los más abundantes están contenidos precisamente en las materias primas naturales que son el punto de partida para la elaboración de tal producto. Desde luego que sus respectivas proporciones - en peso no son las mismas en el cemento portland que en la corteza terrestre.

En el caso del cemento portland el elemento más abundante que lo constituye es el calcio, siguiéndole en orden decreciente el oxígeno, el silicio, el aluminio y el hierro -- estos cinco primeros elementos constituyen más del 95% y se encuentran combinados formando silicatos y aluminoferritos cálcicos principalmente. Dichos elementos sumados al sodio, potasio y magnesio representan más del 97% del cemento portland y el poco menos del 3% restante lo forman otros elemen-

tos tales como el azufre y el titanio que siempre están presentes en proporciones mínimas.

4.- Si bien es cierto que el cemento portland no es un compuesto puro, es decir, un compuesto al que se le pueda -- asignar una fórmula química exacta, sin embargo, dado que es tá constituido por cierto número de elementos conocidos que al combinarse entre sí lo hacen según las leyes poderales de la química pura es posible deducir a partir de su composi--- ción elemental toda una serie de relaciones estequiométricas que permiten entender, modificar y controlar sus propiedades tanto durante el proceso de su elaboración como en su aplicación posterior como material de construcción.

II.- PRINCIPALES COMPUESTOS QUE CONSTITUYEN AL CEMENTO PORTLAND.

i.- Desde el punto de vista químico el cemento portland se define como una mezcla de composición heterogénea pulverizada, cuyos componentes esenciales son los siguientes:

- a) silicatos cálcicos
- b) aluminatos cálcicos
- c) aluminoferritos cálcicos
- d) soluciones sólidas, o sea dispersiones en medio ví-- treo de los compuestos anteriores, o combinaciones - de los mismos con los diversos óxidos que incidental mente se encuentran en las arcillas, pizarras, calizas, margas u otras materias primas.
- e) yeso natural (sulfato de calcio dihidratado).

Todos los compuestos que se acaban de mencionar se consideran como compuestos minerales sintéticos, excepto el yeso natural. El análisis químico de ésta mezcla heterogénea, que es el cemento portland, debe indicar una composición de-

terminada dentro de ciertos límites especificados por las -- normas, reglamentos o pliegos de calidad que sobre el particular rigen en el país; y dicha mezcla debe además ser capaz de reaccionar con el agua para formar una masa plástica susceptible de moldearse, que al endurecerse adquiera determinadas propiedades físicas de resistencia mecánica a la compresión a la flexión y a la tensión; también debe ser resistente a la acción intemperizante de los agentes atmosféricos o terrestres.

2.- Las materias primas, de naturaleza calcárea, arcillosa o pizarrosa, silícea y férrica, previamente trituradas, proporcionadas, pulverizadas y homogeneizadas, pasan por un horno rotatorio donde mediante un proceso de síntetización a temperaturas comprendidas entre los 1300 y 1400°C tiene lugar la síntesis de toda la serie de compuestos químico-minerales anteriormente mencionados. Al conjunto de esta serie de compuestos, cuyo aspecto físico es el de un magma granular fundido, que al enfriarse bruscamente adquiere consistencia pétreo, se le denomina clínker. El producto que resulta de la molienda conjunta, a un alto grado de finura, del clínker con una pequeña proporción de yeso natural correctamente dosificada es el cemento portland cuya definición y características genarales ya han sido especificadas.

Hasta la fecha se has identificado los siguientes compuestos en el clínker: silicatos tricálcico y dicálcico, aluminatos tricálcico, dicálcico y pentacálcico, ferrito dicálcico y aluminoferrito tetracálcico. En el clínker siempre -- existe además óxido de magnesio (MgO) y cal libre (CaO), cuyas proporciones deberán reducirse a un mínimo posible. Presentes también en el clínker se encuentran los llamados "óxidos menores" en proporciones mínimas, tales como: los óxidos alcalinos (Na_2O y K_2O), el dióxido de titanio TiO_2 , el ses-

quióxido de manganeso (Mn_4O_6), el óxido ferroso (FeO) y el anhídrido fosfórico (P_4O_{10}).

3.- Respecto al criterio mineralógico relativo a la composición del clínker, se debe mencionar que Le Chatelier primero, y diez años más tarde Toerneborn en las postrimerías - del siglo XIX, después de estudiar e identificar mediante métodos microcristalográficos los compuestos del clínker propusieron que se les considerase como "minerales sintéticos" y no únicamente como compuestos químicamente puros. Este criterio fue sustentado por Forsen durante el "Simposium sobre la Química de los Cementos" que tuvo lugar en Estocolmo, Suecia, en el año 1938.

Mineralógicamente se considera que el clínker está constituido por las siguientes cuatro fases principales: a) alita, b) belita y felita, c) celita y d) materia intersticial isotrópica.

En consecuencia, de acuerdo con el criterio minerológico que se acaba de exponer, los principales componentes del clínker parecen estar constituidos por soluciones sólidas de los compuestos y óxidos mencionados, es decir, que su constitución es semejante a la que se observa en las llamadas gemas o "piedras preciosas", tales como el rubí, el zafiro, la esmeralda, etc; todas ellas tienen en mayor proporción Al_2O_3 (esto es, químicamente son alúmina), pero también tienen pequeñísimas concentraciones de sales u óxidos de hierro, manganeso u otros metales, cuyos iones dispersos en el seno del compuesto principal son los causantes según el grado de oxidación, de las diversas tonalidades coloridas que caracterizan a cada una de las denominadas gemas.

4.- Así, cualquiera que sea el punto de vista ó criterio que se adopte respecto a lo que en realidad es, o más --bien parece ser el cemento portland, siendo éste una mezcla

heterogénea bastante compleja formada por compuestos constituidos por la combinación de tres o más elementos, es posible simplificar considerablemente el estudio de dichos compuestos y del conjunto que forman la mezcla de los mismo, su poniendolos como si fueran en realidad asociaciones resultantes de la unión de compuestos binarios más sencillos.

En efecto, todos los elementos presentes en el cemento portland, tanto metálicos como no metálicos, de hecho están combinados con el oxígeno y en consecuencia los compuestos principales que constituyen al cemento portland se pueden -- considerar como asociaciones moleculares de óxidos básicos -- con óxidos ácidos y también anfóteros. Además, aceptando el criterio geológico y mineralógico según los cuales se acostumbra representar tanto a los silicatos como a otros minera les como contituídos por la suma de cierto número de óxidos aunque su estructura real no sea exactamente tal, tácitamente se tendrá que admitir que las fórmulas como óxidos son -- las más convenientes para representar correctamente con bastante aproximación la composición del cemento.

III.- QUIMICA DE LA CALCINACION.

La estructura esencial del clínker consiste en una mezcla de cuatro componentes cristalinos de calcio, dos de ellos con sílice, uno con alúmina y el último en conjunto con alúmina y óxido férrico.

La conversión de crudo a clínker es un proceso químico y lo mismo que la producción de cualquier otro producto químico industrial, es esencial que se tenga un conocimiento bá sico de las reacciones químicas que toman lugar dentro del -- proceso.

El conocimiento de estas reacciones básicas ayudará y --

permitirá desarrollar una estrategia de control para establecer los límites de alimentación que el horno puede tolerar - según sean las variaciones químicas presentes.

En la industria del cemento portland se utilizan fórmulas abreviadas para designar los constituyentes principales de las materias primas y son:

C para la cal (CaO)

S para la sílice (SiO_2)

A para la alúmina (Al_2O_3)

F para el óxido férrico (Fe_2O_3)

Como ya se había mencionado, los cuatro compuestos principales del clínker y sus características primordiales son:

El silicato tricálcico C_3S , que es el de mayor influencia en el desarrollo de la resistencia temprana en el cemento, frecuentemente se le refiere con el nombre de alita y bajo este nombre se infiere que no es C_3S puro sin que esté modificado por la presencia en solución sólida de algunos constituyentes menores, en particular el óxido de magnesio (MgO) y alúmina (Al_2O_3).

El silicato dicálcico, que contribuye a la resistencia del cemento con un ritmo más lento que el anterior, se le refiere también como belita.

Los dos siguientes compuestos son: el aluminato tricálcico C_3A y el aluminoferrito tetracálcico C_4AF ninguno de los cuales intervienen sustancialmente en la resistencia del cemento, pero tienen una marcada influencia sobre las características del fraguado y ambos constituyen la fase líquida o fundida del clínker a las temperaturas de calcinación.

Tal como se verá más adelante, se tiene que la composición completa del clínker está definida normalmente por las siguientes tres relaciones de uso general:

- La relación de sílice (S/R)
- La relación de alúmina (A/F)
- El factor de saturación de cal (FSC)

en donde tenemos que:

A.- La relación de sílice es la proporción del contenido de sílice con respecto a la suma del contenido de alúmina y óxido férrico en el cemento, lo cual se expresa como:

$$\frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3} \quad \text{ó bien} \quad \frac{S}{A + F} \quad \text{ó} \quad S/R$$

La significación de este factor se aclarará posteriormente, pero se puede decir simplemente bajo el punto de vista de la composición que a mayor relación de sílice es mayor la proporción de silicatos de calcio en el cemento, siempre y cuando no hayan cambiado los otros factores.

B.- La relación de alúmina-ferro, es la que relaciona el contenido de alúmina con respecto al contenido de hierro en el cemento, y se expresa como:

$$\frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3} \quad \text{ó más brevemente} \quad A/F$$

esta relación determina la proporción de aluminato tricálcico C_3A con respecto al aluminoferrito tetracálcico C_4AF , y tenemos que mientras más alto es el valor de esta relación, mayor es la proporción de C_3A .

C.- Como enfoque general en la producción de clínker, se trata de producirlo con un contenido de C_3S tan alto como sea posible, lo cual depende de la composición total de las materias primas disponibles y de las condiciones del proceso. A la forma potencial para lograr este contenido de C_3S se le conoce con el nombre de factor de saturación de cal el cual se define como:

$$\%FSC = \frac{(CaO) - 0.7(SO_3)}{2.8(SiO_2) + 1.2(Al_2O_3) + 0.65(Fe_2O_3)} \times 100$$

En donde cada símbolo entre paréntesis se refiere al -- porcentaje de los óxidos con el peso total del cemento, ex-- cluyendo cualquier contenido en el residuo insoluble.

Se verá después que esta expresión asume que todo el -- SO_3 está presente combinado con el CaO y el $0.7(SO_3)$ repre-- senta el CaO equivalente al SO_3 en $CaSO_4$.

Esta expresión se ha derivado de estudios de combina--- ción de equilibrios de estos materiales. Cuando el FSC es -- 1.0 (o sea el 100%) la proporción máxima de sílice está pre-- sente potencialmente como C_3S . A medida que el FSC se hace -- menor que 1.0 la proporción de sílice en la forma de C_3S di-- minuye y aumenta como C_2S .

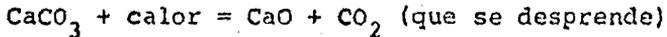
Las reacciones químicas que suceden dentro del horno -- son complejas y aún no se entienden completamente. Afortuna-- damente las reacciones que tienen influencia directa en el -- control, se conocen con suficiente detalle para permitir una estrategia de control en las operaciones a desarrollar en -- los hornos. Las reacciones más importantes desde el punto de vista de operación, son:

- a.- La descarbonatación, ya que ésta tiene el mayor e-- fecto dentro del calor requerido para clinkerizar -- (producir clínker).
 - b.- La formación de fase líquida, la cual determina la velocidad de reacción del proceso final de clinkeri-- zación (proceso por el cual se obtiene el clínker).
- A continuación se hace un análisis más profundo de ambos pro-- cesos.

DESCARBONATACION Y REQUERIMIENTOS DE CALOR EN LA
PRODUCCION DE CLINKER.

El mayor componente en el crudo de cemento es el carbonato de calcio, el cual se obtiene de las materias primas -- tal como la caliza; la mayoría de las mezclas normales de -- crudo contienen entre el 75 y 80% de carbonato de calcio.

Al calentar el carbonato de calcio, se desprende bióxido de carbono, dejando monóxido de calcio. Esta reacción se puede expresar de la siguiente manera:



En los hornos de cemento, la descarbonatación general -- mente se alcanza a temperaturas entre 600 y 1000°C.

Aunque la reacción de descarbonatación ocurre en todos los tipos de sistemas de hornos, tales como los semisecos y de proceso húmedo, ésta es de particular importancia en el -- control de hornos con precalentador de cuatro etapas. Es muy importante balancear cuidadosamente las proporciones relativas de la descarbonatación, tanto la que ocurre en el horno como la del precalentador, ya que si se descarbonató muy poco en el precalentador se tendrá que descarbonatar más en el horno, y puesto que la transferencia de calor dentro del hor-- no es bastante menos eficiente su producción disminuirá. Aho-- ra bien, si se hace mucha descarbonatación resultará que las temperaturas del material y gas serán mayores con el consi-- guiente peligro de bloqueos en el precalentador, además de -- una disminución de producción debida a la alta temperatura -- de los gases que causan reducción de capacidad en el ventila-- dor de tiro inducido.

Usualmente la descarbonatación deberá estar cerca del -- 40% completa a la entrada del horno, debiendo mantener ésta constante para conservar la estabilidad del horno. La reac--

ción de descarbonatación requiere de una considerable cantidad de calor para completarse, por lo cual es endotérmica.

La reacción de descarbonatación en el crudo de cemento requiere aproximadamente de 490 Kcal/Kg de clínker producido, lo cual en un horno con precalentador con un consumo de combustible de 800 Kcal/Kg de clínker, representa el 60% del total de calor de entrada al horno. Por esta razón es que la reacción de descarbonatación tiene gran importancia, y debe asegurarse que el combustible que se usa se queme correctamente, así como el calor que se entregue en las zonas requeridas del horno. De otra manera, se tendrá una inestabilidad de proceso con la consiguiente reducción de producción.

Reacción de descarbonatación = 490 Kcal/Kg c.

Si el horno consume 800 Kcal/Kg c.

Descarbonatación = $(490/800) \times 100 = 60\%$

Hay muchas otras reacciones que ocurren dentro del horno, tanto endotérmicas como exotérmicas dando como resultado que el calor teórico requerido para procesar un kilogramo de clínker, es de alrededor de 420 Kcal/Kg c.

Esta cifra varía de acuerdo a la composición química. Se ha desarrollado una ecuación para estimar los efectos de cambio de cada composición con respecto al calor requerido para clinkerizar.

490 -, reacción exotérmica = 420 Kcal/Kg c.

La más comunmente usada es la de Zur Strassenn:

$$Q = 2.2A + 6.48M + 7.646C - 5.116S - 0.59F$$

en donde:

Q = calor teórico en Kcal/Kg

A = gramos de Al_2O_3 por 100g de clínker

M = gramos de MgO por 100g de clínker.

C = gramos de CaO por 100g de clínker.

S = SiO_2 en el análisis de clínker, sin considerar pérdidas por ignición.

F = % de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Mn}_2\text{O}_3$ en el análisis de clínker, sin considerar pérdidas por ignición.

Resumiendo lo anterior, se ve claramente que la reacción de descarbonatación es una de las de mayor importancia especialmente en hornos con precalentador, todo esto referido a la estabilidad y máxima producción del sistema precalentador-horno, ya que el control del grado de descarbonatación se realiza dentro del precalentador.

La reacción de descarbonatación también es de gran importancia en todos los otros tipos de sistemas de hornos, teniendo gran influencia tanto en la estabilidad de la operación como en la producción máxima.

FASE LIQUIDA.

Además del carbonato de calcio provisto por la caliza, el crudo de cemento contiene componentes de arcilla y pizarra que proporcionan la sílice, la alúmina y el óxido ferri-co. En el proceso de clinkerización todos éstos compuestos reaccionan conjuntamente para formar silicatos de calcio, aluminatos de calcio y un compuesto complejo de calcio, alúmina y fierro.

Aunque estos líquidos forman compuestos que no contribuyen a la resistencia del cemento, son parte esencial del proceso de quemado.

Las reacciones entre partículas toman lugar muy lentamente, pero si éstas están en solución entonces la reacción es mucho más rápida, siendo éste el proceso de clinkerización. Si no hubiera fase líquida, la formación de clínker to

maría bastante más tiempo y se necesitaría una mayor temperatura.

Se tiene que la reacción crítica es la que sucede entre la cal libre y el silicato dicálcico para dar silicato tricálcico el cual es el componente principal del clínker de cemento. Esta reacción toma lugar cuando las partículas de cal libre se disuelven en la fase líquida.

La composición completa del clínker está definida normalmente por las siguientes tres relaciones de uso general:

- La relación de sílice
- La relación de alúmina
- El factor de saturación de cal

Todas estas relaciones afectan la cantidad y naturaleza de la fase líquida, siendo la más importante la relación de sílice y posteriormente la relación de alúmina.

En conjunto a la función de apoyo a la combinación química, la fase líquida también realiza otra función vital, -- que es la de promover la formación de un clínker nodular, es to de forma particular en aquellos procesos con precalentador de suspensión que tiene una alimentación de polvo fino. La habilidad de la fase líquida para nodulizar el resto del producto en la zona de quemado nuevamente es función de su cantidad y naturaleza, la cual está ligada a las tres relaciones base.

La cantidad de líquido producido, puede estimarse con base en varias fórmulas:

$$\% \text{líquido a } 1338^{\circ}\text{C} = (6.1 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3) \text{ cuando } A/F > 1.38$$

$$\% \text{líquido a } 1400^{\circ}\text{C} = (2.9 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) + (2.2 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\% \text{líquido a } 1450^{\circ}\text{C} = (3.0 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) + (2.25 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Aunque la relación de alúmina desempeña un papel menor en la influencia de la cantidad de líquido a las temperaturas de quemado ésta es un factor clave en la determinación

de cantidad de fase líquida formada inicialmente en la región de los 1338°C.

El resultado de dar una mayor cantidad de líquido sobre una longitud mayor en la zona de calcinación es tener un marcado efecto en la combinación química y formación de nódulos de clínker, además de una mejor disposición para controlar - cualquier tendencia a escurrimientos. Cualquier cambio hacia este nivel óptimo en la relación A/F de 1.38, indudablemente será benéfico en los hornos con precalentador. La relación - de CaO con dos moléculas de CaO.SiO₂ depende de la disolu- - ción de calcio en la fase líquida y es por lo tanto depen- - diente de la proporción de solución.

Esto es controlado por el tamaño de las partículas de - CaO, las cuales a su vez dependen del tamaño de las partícu- - las de caliza de la mezcla cruda.

El tiempo requerido para la reacción se ha encontrado - que es proporcional al diámetro de la partícula y depende de la recíproca de las temperaturas absolutas:

$$t_{\text{reac}} \propto \phi_{\text{partícula}} \cdot 1/T_{\text{abs.}}$$

La reacción de alúmina también es importante por la in- - fluencia que tiene la viscosidad de la fase líquida, resul- - tando en general que a menor proporción, menor es la viscosi- - dad de esta fase dando como resultado una disposición mejor del material para fluir en contacto con las partículas sólidas y así afectar a la combinación sobre una mayor longitud de la zona de quemado. El tiempo encontrado para la reacción de las partículas de CaO en la fase líquida se muestra en la tabla No. 1.

Así para una composición dada de fase líquida, se puede ver que la velocidad de reacción depende altamente de la tem

peratura, y que los cambios de ésta no únicamente afectan la velocidad de reacción sino que también aumenta el contacto entre las partículas sólidas y la fase líquida debido al cambio de viscosidad.

TABLA No. 1

Temperatura °C	Diámetro de partículas (mm).			
	0.1	0.5	0.025	0.01
1340	115	59	25	12
1375	28	14	6	4
1400	15	5.5	3	1.5
1450	5	2.3	1	0.5
1500	1.8	0.7	-	-

Tiempo en minutos.

Habiendo mencionado los beneficios de tener suficiente fase líquida, es importante hacer notar que tanto muy poca o mucha fase líquida originará problemas. Es muy fácil formar gran costra en la zona de quemado, y esto puede convertirse en anillos y bolas de clínker, especialmente cuando se quema a alta temperatura para mantener la estabilidad del horno. Por esta razón es conveniente fijar un límite a la relación de sílice puesto que ésta determina la cantidad de líquido en la zona de calcinación.

Parece ser ampliamente aceptado como un nivel de trabajo correspondiente, dado por la experiencia, un valor de 2.2 el cual corresponde a un nivel de líquido de alrededor de 25%.

Por el otro extremo de la escala es bastante obvio que es posible tener muy poco líquido bajo el punto de vista de combinación química, tanto como para la formación de clínker.

cuando la relación de sílice en la mezcla cruda se eleva a cerca de 3.0 y la cantidad de líquido cae debajo de 20%, entonces empiezan a aparecer dificultades para controlar los escurrimientos y producir un clínker que permita una operación eficiente del enfriador.

Resulta igualmente evidente de lo asentado, que son muchos los factores que pueden ser originados por la combinación de los materiales alimentados al horno en la producción de clínker. La temperatura a la cual en un tiempo determinado, se completa sustancialmente la combinación de la cal está influenciada no únicamente por la composición química de la mezcla sino también por la naturaleza mineralógica de las materias primas y la finura a la cual se muelen. Es imposible predecir directamente el efecto de los cambios de estos parámetros en la operación del horno y, por lo tanto, se ha tenido que desarrollar un método de laboratorio. Se han adoptado regímenes de calentamiento estándar para reproducir tan cerca como sea posible las condiciones de quemado y la temperatura de combinabilidad que arbitrariamente se define como aquella temperatura en donde el clínker contiene 2% de cal libre y se utiliza para caracterizar los efectos del cambio en la mezcla cruda.

Dentro del factor de saturación de cal, existe un punto ligeramente mayor del 100% en donde ninguna cantidad de quemado reducirá la cal libre a 2%, significando esto una mezcla cruda con exceso de cal.

Una situación similar existe respecto a la relación de sílice, en donde la mezcla cruda aumenta su dificultad de combinarse, cuando ésta aumenta se empieza a tener una disminución del contenido del líquido. Sin embargo, en el caso de la relación de sílice no se alcanza un límite absoluto, aunque la combinación sea extremadamente difícil al ir la rela-

ción de sílice alcanzando valores próximos a 4.0.

No ha sido posible aún diferenciar precisamente entre los valores de la sílice libre y la combinada con respecto a la temperatura de combinabilidad. Se puede suponer que la sílice combinada en forma de silicatos complejos de aluminio, se disuelve en el líquido más rápidamente y por lo tanto se combinará con la cal a una menor temperatura. Lo anterior -- probablemente es cierto aunque mucho depende del tamaño de las partículas. La temperatura de combinabilidad puede afectarse adversamente por la presencia de partículas gruesas de sílice libre. Una molienda fina o bien cuando la sílice está finamente distribuida entre toda la caliza en su estado natural, facilitará la combinabilidad.

También es importante la naturaleza de las materias primas por ejemplo, en las margas, los constituyentes de calcio y arcilla están íntimamente asociados y probablemente la combinación entre ellas ocurra relativamente antes en comparación con una mezcla de caliza pura y arcilla, cuya combinación es más difícil de lograr con el quemado.

Los estudios de combinabilidad indican para unos materiales dados, como cambia la velocidad de reacción con respecto a la composición química y la finura de la mezcla cruda, pero no siempre es posible predecir por medio de los datos de combinabilidad la calidad potencial del cemento.

Se debe entender que la temperatura de combinabilidad es una temperatura estimada bajo condiciones estándar de laboratorio y que no es la temperatura real dentro del horno. La temperatura de combinabilidad necesaria es aquella que produce un clínker con un contenido de 2% de cal libre. El tiempo de calentamiento también es importante en los resultados de combinación. Se debe tener cuidado cuando se aplican estos resultados a los hornos con precalentador, debido a --

que las altas cargas circulantes de álcalis y SO_3 pueden afectar la interpretación de los mismos.

PROCESO DE CLINKERIZACION

1.- EFECTO DE LA COMPOSICION SOBRE LOS CONSTITUYENTES CRISTALINOS DEL CLINKER.

Los principales constituyentes en el clinker, alita y belita, son esencialmente C_3S y C_2S respectivamente. Ellos se encuentran embebidos en un líquido normalmente cristalino de aluminato tricálcico C_3A y ferroaluminato tetracálcico C_4AF . Variaciones en las relaciones que definen la composición del clinker, como son FSC, S/R y A/F, alteran las cantidades de los principales constituyentes del clinker.

1.1. EFECTO DEL FACTOR DE SATURACION DE CAL (FSC)

Esta relación afecta los potenciales proporcionales de C_3S y C_2S . Aumentando el FSC del clinker a una cal libre --- constante, aumenta la cantidad de C_3S a expensas del C_2S .

1.2. EFECTO DE LA RELACION DE SILICE (S/R)

El mayor efecto de la S/R es sobre la cantidad de fase líquida presente a la temperatura de clinkerización. Cuando la S/R es baja, la cantidad de fundente es alta y viceversa. Reduciendo la cantidad de fase líquida (aumentando la S/R) - aumenta la proporción de silicatos y a FSC constante se obtiene un aumento en la cantidad de C_3S .

1.3. EFECTO DE LA RELACION DE ALUMINA (A/F)

La fase líquida consiste potencialmente de C_3A y C_4AF - con pequeñas cantidades de sílice, magnesio, cal, manganeso, etc. A más alta relación A/F es mayor la proporción de Al_2O_3 relacionada al Fe_2O_3 . La viscosidad del fundente es afectada por esa composición; a mayor relación A/F la fase líquida es más viscosa a una temperatura determinada o contrariamente, se necesita una mayor temperatura para producir una determi-

nada viscosidad. La cantidad inicial de fundente producido depende de la relación A/F y puede tener significativos efectos en el proceso de calcinación y subsecuentemente en la calidad del clínker.

Existen fórmulas para calcular las cantidades de fase líquida formada a varias temperaturas; esto se verá posteriormente. Las alteraciones en la relación A/F no cambian significativamente la cantidad total de silicatos a FSC; con el aumento del A/F la cantidad de C_3S decrece y el contenido de C_2S aumenta.

2.- EL PROCESO DE CLINKERIZACION.

La calcinación del clínker consiste en una serie de reacciones entre partículas devididas y químicamente diferentes. En general las reacciones pueden enunciarse en la siguiente forma:

- a) Evaporación del agua libre
- b) Pérdida del agua de combinación en los minerales arcillosos
- c) Disociación de carbonatos (descarbonatación)
- d) Combinación entre la caliza y la arcilla (y mineral de fierro cuando se agrega)

Si bien la evaporación del agua libre no constituye propiamente una reacción, su gran consumo de calor tanto en forma sensible como latente la hace importante para los cálculos térmicos.

Estas reacciones no siempre ocurren separadamente; algunas veces la cal comienza a reaccionar con la arcilla mientras la descarbonatación se está realizando aún. En este rango de temperaturas las reacciones ocurren a través de la formación de fundentes de bajas temperaturas formadas en puntos

de contacto entre las partícula diferentes y por difusión - del estado sólido.

Como los materiales son transportados a través del horno y con la elevación de temperatura se produce más fundente, el primer fundente y las reacciones aumentan enormemente, -- así como la cantidad de fase líquida aumenta al máximo a la más alta temperatura en la zona de calcinación.

Una baja temperatura del fundente entre la cal y sílice puede dar como resultado la formación de C_2S antes de la zona de calcinación, resultan también formaciones de C_3A por - reacción entre las partículas de cal y arcilla.

En el proceso seco con precalentador de suspensión pueden producirse bajas temperaturas del fundente en la entrada del horno. Esto origina que las partículas al conglomerarse y aumentar su tamaño reduzcan la carga circulante de alimentación dentro del precalentador, disminuyendo la producción del horno. El alcance y naturaleza de éstas bajas temperaturas de los fundentes son también factores que infuyen en la solidéz de los nódulos en el proceso semiseco.

A la temperatura de calcinación la reacción continúa rápidamente, el C_3S se forma por cristalización del fundente - dentro del cual la cal y sílice se disuelven y, dependiendo de la composición, el C_2S también puede cristalizar.

El enfriamiento principia teóricamente tan pronto como el clínker pasa el punto máximo de temperatura en la zona de calcinación. En el trayecto hacia la descarga del horno el - clínker, al pasar la zona de la flama, se enfría por el aire secundario a pesar de que todavía recibe calor de radiación proveniente de la flama.

3.- FACTORES QUE AFECTAN LA COMBINACION .

3.1. EFECTO DE LOS PRINCIPALES PARAMETROS EN LA COMBINA BILIDAD.

La temperatura a la cual en un tiempo hay completa combinación de la cal, es influenciada no solo por la composición química de la mezcla, sino también por la naturaleza mineralógica de las materias primas y de las finuras de las que son molidas.

Se sabe que aumentando el FSC o con FSC constante, al incrementar la relación S/R la cantidad de C_3S o alita aumenta y por lo tanto, con idénticos materiales, es necesaria una temperatura alta para efectuar la combinación.

El efecto sobre la temperatura de combinabilidad del FSC, S/R y residuo de alimentación, los aumentos en cada uno de estos factores provocan dificultades de combinación. Con el FSC se alcanza un punto sobre el 100% donde ningún aumento de la temperatura de calcinación reducirá la cal libre a 2% y la mezcla está sobresaturada de cal y la cal libre será formada como una fase primaria a la temperatura de calcinación. Una situación similar existe cuando el S/R en la mezcla se vuelve muy difícil de combinar como en el caso de los S/R más altos, es decir, se aproximan a los contenidos de fundentes decrecientes. Sin embargo en el caso del S/R no se alcanza un límite absoluto aunque la combinación puede volverse extremadamente difícil según se eleve el S/R a niveles próximos a la región de 4.0.

Todavía no ha sido posible diferenciar exactamente los efectos de la sílice libre y la sílice combinada sobre la temperatura de combinabilidad. Podría suponerse que la sílice combinada en la forma de silicatos de aluminio se disuelven más fácilmente y por lo tanto se combina con la cal a baja temperatura. Esto es probablemente cierto, pero depende mucho del tamaño de la partícula. La temperatura de combinabilidad puede ser adversamente afectada por la presencia de partículas gruesas de sílice libre. Con molienda fina o con

la sílice finamente distribuida dentro de la caliza en estado natural, mejora la combinabilidad .

En otros casos la naturaleza de las materias primas es importante. en la marga por ejemplo, en carbonato de calcio y los constituyentes de la arcilla están íntimamente asociados y es probable que la combinación ocurra rápidamente, sin embargo cuando una mezcla de caliza compacta y pizarra se -- calcina, la combinación puede ser más difícil de alcanzar. - Esto es ilustrado por la temperatura de combinabilidad de una mezcla de caliza y pizarra que a determinado FSC es ----- 1500°C, la que es bajada a 1480°C cuando la mezcla es caliza arcillosa y pizarra.

Estudios de las temperaturas de combinabilidad indican que para determinados materiales los ciclos de reacción cambian con la composición química y la finura, pero no siempre es posible predecir de los datos de combinabilidad la calidad del cemento. En términos generales, sin embargo, puede - decirse que las mezclas con temperaturas de combinabilidad - menores de 1450°C son fácilmente combinables; aquellas con - temperaturas dentro de 1400-1425°C son moderadamente fáciles; las de 1425-1450°C difíciles; y las de arriba de 1450°C muy difíciles. Debe entenderse que la temperatura de combinabilidad es una temperatura bajo condiciones estándar de calcinación en el laboratorio y no es la temperatura real en el horno, la cual es necesaria para producir un clínker con 2% de cal libre. El tiempo de calcinación es también importante en el efecto de combinación.

4.- REGIMEN DE CALCINACION.

4.1. INFLUENCIA DE LA COMPOSICION EN LA CALIDAD DEL CLINKER.

De la breve sinopsis de las reacciones que toman lugar

en el clínker se ha visto que la formación de alita o C_3S depende del grado al cual la cal y la sílice pueden disolverse en el fundente y en el tiempo durante el cual los cristales formados permanecen en contacto con el líquido a alta temperatura. El C_3S es el principal compuesto de las resistencias dadas por el clínker.

4.2. REGIMEN OPTIMO DE CALCINACION.

Es obvio que la calcinación del clínker para producir la mejor calidad de cemento es gobernada, por un lado, por la fuerte calcinación en un intento de producir el máximo contenido de C_3S , y por otro lado, por la necesidad de limitar el crecimiento de los cristales de C_3S . Por lo tanto hay un régimen óptimo de calcinación en el cual para una determinada composición se logra una adecuada combinación con el mínimo crecimiento de los cristales. Esto algunas veces causa tener cal libre mayor de la que normalmente debería ser considerada aceptable, pero acompañada por altas resistencias en el cemento. A altas temperaturas los cristales de C_3S crecen, la cal libre disminuye y la calidad del cemento baja.

El concepto de las condiciones de calcinación óptima para una determinada mezcla es de fundamental importancia en la producción de cemento de alta calidad.

4.3. CONDICIONES REDUCTORAS EN EL HORNO.

Pueden ocurrir condiciones de reducción cuando la relación combustible/aire es incorrecta o cuando la mezcla cruda contiene material carbonoso. También puede ocurrir si el combustóleo se deposita sobre la cama de clínker debido a una flama incorrecta. Debido a estos errores operacionales el Fe_2O_3 es el principal óxido afectado por la reducción, -

pues al perder oxígeno a alta temperatura es reducido, pasando a FeO , o aún a fierro metálico. Esto, por supuesto, se debe a una pérdida de la fase de ferrita o aumento real del A/F.

Las condiciones reductoras propician la formación del ión Fe^{++} el cual puede sustituirse dentro de la estructura cristalina del C_3S o alita. Cuando este clínker es reoxidado y abandona la zona de calcinación al encontrar el aire secundario, el ión Fe^{++} pasa al ión Fe^{+++} la estructura del C_3S no puede acomodar este ión y resulta una degradación del C_3S en un aumento del C_2S o belita y cal libre.

5.- LA FASE LIQUIDA.

5.1. LA IMPORTANCIA DE LA FASE LIQUIDA.

Se ha mostrado anteriormente como la mayor parte del proceso de la clinkerización toma lugar a través de la fase líquida, la cual se desarrolla cuando la temperatura se incrementa. La mayor parte de los clínkeres contienen de 20-30% de líquido en la zona de calcinación. Puesto que la combinación y la producción de alita dependen de la formación de líquido la mínima temperatura, a la cual se forma una mezcla pura es de gran importancia.

5.2. EFECTO DE LA COMPOSICION EN LA FASE LIQUIDA.

Generalmente se considera que la más baja temperatura a la cual se forma la fase líquida está en el rango de 1250-1300°C. Mientras que casi todas las composiciones de las mezclas crudas probablemente forman líquido a esa temperatura, la cantidad de líquido formando y el aumento en cantidad con la temperatura depende de la proporción de alúmina, óxido férrico y otros menos importantes, y variará enormement

te de una a otra mezcla. La cantidad de líquido formado a una temperatura dada puede ser calculado aproximadamente por las siguientes fórmulas:

% líquido formado a 1338°C = (6.1) (Fe₂O₃)

% líquido formado a 1400°C = (2.95) (Al₂O₃) + (2.2) (Fe₂O₃)

% líquido formado a 1450°C = (3.0) (Al₂O₃) + (2.25) (Fe₂O₃)

estas se aplican a clíkeres con un A/F mayor de 1.38.

Cuando el A/F es menor de 1.38 el porcentaje líquido -- formado a 1338°C es de (8.2) (Al₂O₃) - (5.22) (Fe₂O₃).

Tanto la proporción y la viscosidad de la fase líquida dependen del contenido de alúmina y óxido férrico.

Para una relación alta de A/F es más viscosa la fase líquida a una determinada temperatura, o es mayor la temperatura requerida para una viscosidad.

5.3. LA ACTUACION DE LA FASE LIQUIDA EN LA CLINKERIZACION.

Si la proporción de cal y sílice en la fase líquida depende de la viscosidad del fundente, entonces un fundente -- de alta relación A/F requerirá una mayor temperatura que uno de baja A/f para efectuar el mismo grado de combinación. Es de esperarse que la temperatura influya en la formación de -- los cristales de C₃S.

La cantidad de fundente es importante: a mayor fundente en estado viscoso más rápida es la combinación. Un contenido bajo de fundente requerirá una mayor temperatura para -- incrementar su movilidad y facilitar la reacción, y aunque las temperaturas de calcinación pueden ser altas los cristales de alita no necesariamente aumentan de tamaño.

Un clínker de alta resistencia a los sulfatos tiene una baja relación de S/R. Esto significa que la cantidad de

fundente es relativamente alta puesto que el fundente es rico en fierro (bajo A/F) y altamente móvil. Estos dos factores dan como resultado un desarrollo de grandes y bien formados cristales de C_3S .

Cuando el fundente es abundante y su viscosidad marcadamente disminuída por la presencia de manganeso, pueden desarrollarse cristales muy grandes de C_3S .

6.- REGIMEN DE ENFRIAMIENTO.

6.1. ZONA DE ENFRIAMIENTO.

El enfriamiento que es mencionado en esta sección no es solamente áquel que toma lugar después que el clínker deja el horno, sino el período total desde la zona de calcinación. - Desde el punto de vista de la estructura cristalina la parte más importante del enfriamiento toma lugar entre la zona de calcinación y la descarga del horno. El grado de enfriamiento afecta grandemente la cristalización del fundente y también los cristales de C_3S .

Una considerable cantidad de evidencias ha mostrado que con el enfriamiento rápido se logran las más altas resistencias a veintiocho días. El efecto es más marcado a altas relaciones de A/F, disminuyendo cuando decrece el A/F a un mínimo cercano a 1.4 y aumenta de nuevo a relaciones inferiores de A/F.

7.- EFECTO DE LA MEZCLA CRUDA SOBRE LA CALIDAD DEL CEMENTO.

7.1. RESIDUO SILICEO.

Una partícula gruesa de sílice en la mezcla cruda da como resultado un racimo denso de cristales de C_2S , con fre---

cuencia baja en fundente distribuida alrededor de un poro -- dentro del clínker. En la fase inicial del proceso de calcinación, una fusión de baja temperatura se forma en los límites entre la partícula silicea y las partículas de cal que la rodean. Esta fusión se mueve a través de toda la partícula formando silicato líquido bajo en cal, el cual es absorbido dentro de la mezcla cruda que la rodea ya descarbonatada y porosa y así se forma un anillo de belita con el poro característico en su centro.

Se debe notar también que una parte de sílice necesita algo así como 2.8 veces su peso de cal para convertirse en C_3S ; así se origina un desequilibrio más serio de la mezcla, que el que originaba la cal. Una calcinación muy fuerte, sin embargo, puede transportar cal a través del fundente hasta el anillo de C_2S y convertirlo en cristales muy grandes de C_3S los cuales frecuentemente contienen múltiples inclusiones pequeñas y residuos de C_2S o belita.

7.3. EFECTO DEL RESIDUO EN EL TAMAÑO DE CRISTAL.

Esta breve descripción aclarará por qué las partículas grandes necesitan más energía para reaccionar. La cal sin -- combinar deberá reaccionar con el C_2S para formar C_3S . La -- cal debe ser transportada por el fundente a una alta temperatura o se necesitaría más tiempo para el transporte y la -- reacción subsecuente.

Durante este tiempo los cristales de C_3S que ya estaban formados de las partículas finas de la mezcla cruda siguen -- creciendo uniformemente y para cuando ha habido suficiente -- reacción la combinación para producir un contenido aceptable de cal libre el aumento del cristal de alita o C_3S producirá menos que el potencial de calidad. Entre más amplio sea el rango del tamaño de partícula habrá más probabilidad de que

de que los cristales de C_3S formados a temprana edad crecerán excesivamente.

A consecuencia de ésto, la molienda en circuito cerrado es preferible para obtener la máxima calidad del cemento, además de sus efectos químicos.

COMBUSTION, FLAMAS Y QUEMADORES

1.- INTRODUCCION.

El combustible es usualmente uno de los artículos más costosos en la fabricación del cemento. El método de quemar combustible dentro de un horno rotatorio puede afectar a la calidad del clínker, la vida del refractario, la vida de las cadenas (proceso húmedo), la formación de anillos, la operación del enfriador y diversas condiciones tanto en los preca lentadores como en los precipitadores.

Es muy importante mencionar que debido a la importancia de la flama en el proceso de clinkerización se generan graves complicaciones y responsabilidades cuando la flama no es apropiada. Cada cambio significativo del quemador o de la flama requiere cuando menos de tres a seis meses para apreciar el verdadero efecto tanto en la vida del refractario co mo en la producción del clínker.

2.- PODER CALORIFICO.

La principal propiedad de un combustible es su poder calorífico, el cual se puede definir como el calor liberado du rante la reacción de combustión entre el combustible y el o xígeno alimentados ambos a 15°C. Los valores generalmente se expresan en Kcal/Kg para el combustible y Kcal/m³ para el gas.

La definición de poder calorífico alto (gross) implica que el agua en los productos de combustión se considera como un condensado. El poder calorífico bajo (net) asume que el agua en los productos de combustión permanece como vapor. Por lo tanto el poder calorífico bajo siempre será menor que el poder calorífico alto, esta diferencia aumenta conforme el contenido de hidrógeno en el combustible aumenta, debido a que la formación de agua también lo hace.

Cuando se comparan diferentes tipos de combustibles, generalmente se utiliza el valor del poder calorífico bajo, ya que en los sistemas utilizados para la fabricación de cemento, el vapor de agua contenido en los gases de combustión -- por lo general no se condensa.

3.- TIPOS DE COMBUSTIBLES.

Con el fin de generar el calor necesario para que se lleve a cabo el proceso de fabricación del clínker se quemán combustibles. El calor generado es el producto de la reacción química entre el combustible y el oxígeno. Los combustibles que se usan dentro de la industria son hidrocarburos, - por su alto contenido de carbono e hidrógeno, los cuales al oxidarse producen la energía necesaria para el proceso de clinkerización.

El oxígeno necesario proviene del aire, el cual contiene un 23.2% de oxígeno en peso o 21% en volumen y el resto - lo constituye principalmente el nitrógeno que es un gas inerte.

3.1. COMBUSTOLEO.

En México, el combustible disponible y de menor costo - actualmente es el combustóleo pesado, que es la fracción ligera del petróleo con más alto punto de ebullición.

Aunque el combustóleo utilizado proviene de diferentes regiones, sus poderes caloríficos permanecen relativamente - constantes y semejantes entre sí. Con el fin de uniformar -- criterios de cálculo, se debe considerar que el poder calorífico del combustóleo es de 9,500 Kcal/Kg bajo, con una densidad de 0.93 Kg/l a 100°C, teniendo una viscosidad cinemática de 58 centistokes a la misma temperatura (ver apéndice I).

Este combustible tiene un alto contenido de azufre el cual al quemarse produce dióxido de azufre. Este compuesto afecta de las siguientes maneras: la mayor parte reacciona -- con el material alimentado al horno, el cual puede salir con el clínker como sulfatos o retenido en forma de compuestos de azufre lo que puede llegar a formar encostramientos y hasta bloqueos. El resto sale del sistema en el flujo de gases, ésto, además de ser un contaminante ambiental, puede formar ácidos corrosivos que dañan el sistema.

3.2. GAS NATURAL.

El otro combustible utilizado es el gas natural, que está constituido principalmente por metano (92% en volumen) y de otros hidrocarburos gaseosos de mayor peso molecular. La proporción de los diversos hidrocarburos y los inertes en el gas, dependen de la región de obtención de éste.

El gas natural tiene un menor poder calorífico en relación con el combustóleo y es de 8,400 Kcal/Kg bajo, y requiere de más aire para su combustión debido a que el contenido de hidrógeno en relación al peso molecular es mayor. Una de las grandes ventajas del gas natural es el no tener necesidad de atomizar, además de que su manejo es relativamente fácil, su costo por kilocaloría es menor que el del combustóleo y la cantidad de azufre es despreciable.

Debido a la falta de hidrocarburos pesados, la flama es menos radiante, ésto provoca que la transferencia de calor -- debido a la radiación no sea tan eficiente como en la flama de combustóleo.

4.- COMBUSTION.

La combustión se puede definir como la reacción química

que tiene lugar entre el oxígeno del aire y el combustible - la cual produce calor.

En los hornos rotarios se debe suministrar el combustible suficiente para transformar el material crudo en clínker.

Con el fin de obtener el máximo calor de la combustión, la reacción debe ser lo más completa posible, lo que significa que no se debe usar menos aire que el necesario teóricamente para la combustión, éste debe ser suministrado establemente.

Además de proporcionar la cantidad correcta de aire, éste debe mezclarse correctamente con el combustible y así completar la combustión.

En síntesis se puede decir que la combustión consiste - en los tres procesos siguientes: el carbono combinado con el oxígeno produce dióxido de carbono y calor; el hidrógeno combinado con el oxígeno produce vapor de agua y calor, y finalmente el azufre, al hacer lo mismo produce dióxido de azufre y calor.

4.1. AIRE PARA COMBUSTION.

El aire teórico necesario puede ser calculado a partir de la composición del combustible. Para el combustóleo la -- cantidad de aire necesaria (si consideramos la composición química constante) es aproximadamente de 9.8 N m^3 de aire -- por cada litro de combustóleo y 9.9 N m^3 de aire por cada m^3 de gas natural.

Si se suministra menos aire del requerido, la combustión será incompleta y no se aprovechará el calor total de -- combustión y además, se producirán gases combustibles peligrosos que se pueden encender en los precipitadores electrostáticos y en el precalentador produciendo una combustión secundaria y en ocasiones explosiones que pueden dañar el equipo. De aquí la importancia de operar los hornos rotatorios -

con los niveles de oxígeno adecuados.

En la práctica cuando se opera con el aire exacto, la combustión tiende a ser incompleta por lo que se debe operar con un exceso de aire del 5 al 10%, lo que equivale a un 1 al 2% de oxígeno en la cámara de gases del lado de alimentación del horno.

Se debe tener cuidado de que el analizador tome una muestra de los gases saliendo del horno ya que se puede dar el caso de que este gas se mezcle con el aire falso que entra por los sellos del lado de la alimentación del horno, o que el tubo analizador tenga entradas de aire falso, dando así lecturas inexactas, esto se puede evitar introduciendo ligeramente el tubo muestreador dentro del horno y revisando todo el sistema analizador.

Un pequeño porcentaje de monóxido de carbono en los gases de salida representa pérdidas de calor considerables debido a combustión incompleta.

4.2. INDICACION DE COMBUSTION INCOMPLETA.

La mejor indicación de combustión incompleta es la presencia de monóxido de carbono en los gases a la salida del horno. Si no se detecta monóxido de carbono, existen otros métodos disponibles:

- a) Cuando el indicador gráfico de oxígeno marque menos de 0.6% de O_2 o una línea constante.
- b) Cuando los gases de salida del horno y/o el polvo saliendo del sistema huelan a sulfuro de hidrógeno. En la parrilla Lepol se puede apreciar una flama azul de monóxido de carbono en la pared divisoria entre la zona de secado y al zona de precalcínación y a la vez la temperatura del ventilador intermedio puede incrementarse. En ocasiones la flama puede presentar

una apariencia turbulenta y de color anaranjado, en vez de ser bien marcada y brillante.

La consideración práctica más importante es la de asegurar que el nivel de oxígeno a la salida del horno oscile entre 1 y 2%, medidos ya sea por medio del analizador automático o por un análisis Orsat.

4.3. LIMITES DE INFLAMABILIDAD.

Los gases combustibles y las neblinas de combustóleo atomizado requieren para su quemado una determinada concentración máxima y mínima. Por lo tanto en un horno rotatorio, la flama se formará cuando la mezcla de aire-combustible esté dentro de los límites de inflamabilidad.

Los límites de inflamabilidad juegan un papel muy importante en la seguridad del sistema, por ejemplo, en el caso de que se apague la flama cuando se esté encendiendo el horno, se debe tener cuidado en purgar el sistema con aire antes de volver a encender y así reducir la concentración de cualquier combustible por abajo del límite de inflamabilidad.

4.4. TEMPERATURA DE IGNICION.

Para que se lleve a cabo la ignición, la temperatura -- del combustible debe ser elevada a un nivel mínimo, siendo éste variable según las características de cada combustible.

Es por ésto que cuando se prende un horno frío se debe utilizar una antorcha de diesel, gas o leña para alcanzar la temperatura de ignición del combustible. Posteriormente, -- cuando la zona está a una temperatura superior a la de ignición del combustible, la antorcha ya no es necesaria.

5.- FLAMAS.

La longitud y forma de las flamas dentro de un horno ro

tatorio depende de varios factores tales como el tipo de combustible, aire adecuado para la combustión, atomización (en el caso del combustóleo), mezcla del combustible con el aire, temperatura de la zona y temperatura del aire secundario.

5.1. COMBUSTIBLE.

El tipo de combustible tiene influencia en la forma de la flama; por ejemplo en el combustóleo, que contiene un extenso rango de hidrocarburos, los más ligeros se evaporan -- por las altas temperaturas de la zona y se consumen más rápidamente, mientras los más pesados llegan a quemarse como carbón dando color y forma a la flama. El gas natural carece de estos hidrocarburos pesados lo que hace la flama menos radiante y en ocasiones difícil de distinguir.

5.2. AIRE DE COMBUSTION.

Cuando no se suministra el aire necesario no se completa la combustión y la forma de la flama es "fofa y aguda" -- formando nubes negras de carbón. además de no aprovechar todo el calor posible, la flama tiende a golpear el refractario, si el golpeteo es continuo se pueden llegar a formar anillos así como producir un ambiente reductor, lo cual afecta tanto la calidad como la producción de clínker y también la vida del refractario.

5.3. ATOMIZACION.

Cuando el combustóleo sale del quemador y se expande, -- generalmente se atomiza, formando el área de reacción entre el oxígeno y el combustible, por lo tanto entre más pequeñas sean las gotas mayor será el área de reacción y mejor será la flama. La longitud de la flama depende principalmente del -- tiempo individual de cada partícula para ser consumida y la

velocidad de mezclado con el aire.

La atomización depende de los siguientes factores: diseño de la boquilla, presión y viscosidad del combustóleo en la punta del quemador. Una mala atomización tendrá como consecuencia una flama larga, retardará la ignición y en el último de los casos provocará que el combustóleo gotee en el material.

5.3.1. PRESION.

La presión juega un papel muy importante en la atomización y por consiguiente en la flama, ya que si no se opera con los valores de presión especificados por el fabricante del quemador el resultado será una flama mala.

5.3.2. VISCOSIDAD.

La viscosidad del combustóleo también tiene una gran influencia en la formación de la flama ya que cuando el fluido es muy viscoso la formación de pequeñas gotas se hace muy difícil, por consiguiente la atomización es deficiente.

El combustóleo mexicano es muy viscoso y requiere altas temperaturas para alcanzar viscosidades bajas (aproximadamente 130 a 160°C).

Existen varios intercambiadores de calor para calentar el combustible tales como los intercambiadores de aceite térmico que a su vez son calentados con una caldera de gas, intercambiadores de vapor de agua y por último, intercambiadores eléctricos. En ocasiones calentar el combustóleo desde el tanque principal para que éste fluya más fácilmente por el sistema es tarea de dichos intercambiadores.

También existen aditivos especiales para reducir la viscosidad del combustóleo pero debido a que actualmente su costo es tan elevado, su aplicación es poco frecuente.

El gas natural es suministrado en forma gaseosa y por lo tanto ni la atomización ni el calentamiento son necesarios, pero la presión del gas en el quemador debe ser especificada por el fabricante o diseñador. En una flama de gas el mezclado del aire necesario para la combustión y el gas combustible controlan la longitud de la flama.

5.4. MEZCLA AIRE-COMBUSTIBLE.

El mezclado del combustible con el aire necesario para la combustión depende principalmente del aire primario. El aire primario es el que se introduce por el quemador y debe distinguirse del secundario que generalmente proviene del enfriador.

Cuando el combustible y el aire primario salen del quemador sufren una expansión, la que provoca una succión del aire secundario circundante hacia el interior del flujo, posteriormente habrá una recirculación de los gases del aire para completar la combustión. La succión del aire depende principalmente del momento del aire primario por la velocidad del mismo. Después de extensas investigaciones se ha encontrado que los valores óptimos para la cantidad de aire primario y velocidad del gas son de 10% del aire de combustión y 100 m/s en la punta del quemador respectivamente. Estos valores se pueden obtener por medio de ajustes y mediciones in situ.

La zona en donde el aire secundario ha sido succionado representa la longitud mínima posible de la flama y en algunas ocasiones se le conoce como distancia de mezclado.

En los quemadores de gas natural el propio combustible sirve para succionar el aire, por lo tanto entre mayor sea la velocidad del gas saliendo del quemador mayor será la succión y mejor será la flama.

El aire primario también es utilizado para enfriar el quemador.

5.5. TEMPERATURA DE LA ZONA DE CLINKERIZACION Y DEL AIRE SECUNDARIO.

Las partículas de combustible que entran al horno, son calentadas tanto por la radiación de la flama como por el aire secundario caliente del enfriador.

Conforme su temperatura se incrementa, los hidrocarburos ligeros se volatilizan y se prenden más rápidamente.

El gas es calentado principalmente por el aire secundario proveniente del enfriador. Tan pronto como el combustible alcanza su temperatura de ignición se desprende, por lo tanto es importante mantener la zona de clinkerización y el aire secundario lo más alto posible, siempre y cuando no se llegue a dañar el refractario, el enfriador o la calidad del clíinker.

5.6. DISTANCIAS DE IGNICION Y ESTABILIDAD DE LA FLAMA.

La distancia de ignición es la longitud de la punta del quemador hasta donde empieza la flama, la estabilidad de la flama se caracteriza por lo constante de la distancia de ignición.

Son varios los factores que afectan la distancia de ignición, entre ellos están: la temperatura y velocidad del aire primario, la temperatura del aire secundario, la posición del quemador, la volatilidad del combustible y la temperatura de la zona. La estabilidad de la flama generalmente no es un problema excepto cuando se prende el horno, debido a la baja temperatura de la zona de quemado y la relativamente baja del aire secundario. La mayoría de los sistemas de combustión a gran escala dependen de la recirculación de los gases

de combustión calientes para obtener una estabilidad de flama, este principio se aplica cuando se prende un horno frío, ya sea por medio de un quemador de gas adicional, un piloto de diesel, o con leña.

En algunos hornos la flama puede tener la tendencia de empezar en la punta del quemador, lo que ocasiona que se quemé dicha punta, ésto puede evitarse aumentando la velocidad del aire primario.

6.- QUEMADORES.

Las principales funciones de un quemador son:

- a) Proveer una flama tal que se produzca el calor necesario para la formación del clínker con la calidad requerida.
- b) Que tenga la suficiente flexibilidad de operación para poder controlar las condiciones de la zona de clinkerización y así obtener producciones óptimas con un mínimo de consumo de combustible y la máxima vida del refractario.
- c) Que sea mecánicamente confiable reduciendo así el tiempo perdido por fallas en el quemador.
- d) Que cumpla todos los requisitos anteriores con un costo aceptable.

6.1. POSICION DE LOS QUEMADORES DENTRO DEL HORNO.

El quemador deberá apuntar en dirección paralela al eje del horno, y normalmente está colocado en el centro del diámetro del mismo. En ocasiones, cuando el diámetro del horno es muy grande, los fabricantes colocan el quemador ligeramente descentrado hacia la carga del material, pero bajo ninguna circunstancia el quemador deberá estar apuntando delibera

damente hacia la carga, ya que ésto puede causar una mala -- distribución del aire secundario y en consecuencia una posible zona reductora que afecta la calidad del clínker, y lo -- más grave es que puede afectar la estabilidad de costra y -- consecuentemente acortar la vida del refractario.

La punta del quemador generalmente deberá coincidir con el labio del horno. Cada horno es distinto y solamente una -- larga observación podrá determinar la posición óptima.

6.2. QUEMADORES DE COMBUSTOLEO.

Los quemadores de combustóleo utilizados en hornos rotatorios consisten principalmente en un inyector de combustible colocado a lo largo del tubo del aire primario, y es generalmente del tipo de atomización a presión (de 30 a 35---- Kg/cm²) en donde el combustible fluye a través de un orifi-- cio para formar un rocío de gotas.

Existen varios tipos de quemadores de acuerdo al fabricante, pero deben tener ciertas características en común:

- a) Que sean capaces de producir una buena atomización.
- b) Que sean fáciles de operar e instalar (o en su lugar tengan la posibilidad de poder cambiar boqui--- llas para aumentar la flexibilidad).
- c) Que sea posible la variación del ángulo de esparcido.

Existen tres tipos principales de quemadores de combustóleo:

1.- De orificio variable; este quemador es tan antiguo que actualmente no se utiliza. Las ventajas de este quemador son que la presión del combustóleo en la punta del quemador no varía, aunque se altere el diámetro del orificio, y que -- su operación es sencilla. La gran desventaja que tiene éste quemador es su mínima flexibilidad de operación.

2.- De flujo a presión; éste tipo de quemador se carac-

teriza por producir una atomización basándose en la presión y cantidad de flujo de combustible a través de uno o varios orificios especialmente diseñados. La ventaja de este quemador es su sencillez de operación pero tiene la desventaja de tener poca flexibilidad.

3.- De flujo con retorno; como su nombre lo indica, --- existe en ocasiones un retorno de combustible del total alimentado al quemador, esto es con el fin de poder impartir a voluntad una mayor o menor cantidad de flujo radial o axial según sean los requerimientos, lo cual provee una gran ---- flexibilidad de operación. Posee los mecanismos necesarios para poder impartir flujo radial a voluntad al aire primario aumentando así la flexibilidad. La desventaja de este sistema es lo complejo de su operación.

El aire primario debe consistir en un 10% del aire total de combustión a una velocidad de 100 m/s.

También existe la posibilidad de impartir un movimiento radial a este flujo por medio de aspas radiales, lo cual ayudará al mezclado del combustible con el aire.

6.3. QUEMADORES DE GAS.

El gas natural tiene una velocidad de ignición baja, lo que provoca problemas de estabilidad de flama, también tiene la tendencia de producir una flama poco luminosa por lo que la transferencia de calor por radiación es baja. Por estas razones el diseño de un quemador de gas tiene que ser dirigido a resolver estos problemas. La flama se puede hacer más luminosa iniciando la combustión donde la concentración del combustible es máxima promoviendo así la formación de partículas de carbón, esto se puede lograr tomando la ventaja de la presión disponible del gas e impartiendo flujo radial, acortando de esta manera la flama.

Se debe aprovechar que el combustible es gaseoso para -
succionar la mayor cantidad posible de aire, para esto se re
comienda utilizar la máxima velocidad posible, o sea veloci-
dades sónicas. A este flujo también se le puede impartir mo-
vimiento radial.

BALANCES TERMICOS

1.- INTRODUCCION.

Los conocimientos del proceso de transferencia de calor en los hornos rotatorios son relativamente limitados.

La producción de clínker es una reacción química principalmente endotérmica compleja, que requiere una gran cantidad de calor para completarse. En función de obtener las producciones máximas y las eficiencias térmicas más óptimas dentro del proceso de clinkerización, es conveniente que se tengan conocimientos de como se transfiere el calor producido de la combustión al material en el horno.

2.- MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

Existen tres mecanismos básicos de transferencia de calor, que son: Conducción, Convección y Radiación, todos éstos ocurren en la transferencia del calor de la flama a la carga dentro del horno, pero el más importante de todos estos mecanismos es la radiación.

La conducción es la transferencia de calor a través de un material fijo, es un flujo de calor sin desplazamiento observable de materia, o sea, el movimiento molecular es transportado a otras moléculas debido al gradiente de temperatura.

La convección es la transferencia de calor entre partes de un fluido, entre las cuales existe un gradiente de temperatura, por medio de las moléculas del fluido.

La radiación involucra la transferencia de energía radiante desde una fuente a un receptor, es una transferencia de energía a través del espacio mediante ondas electromagnéticas.

El calor puede ser transferido en varias formas ya sea

radiado de la flama directamente a la carga, de la flama radiado a las paredes del horno y de ahí rerradiado a la carga.

Al ir girando el horno, la carga forma una cascada sobre la pared del horno y se transfiere el calor hacia la carga por conducción de la pared.

También hay algo de transferencia de calor por convección entre los gases y la carga.

La razón de la importancia de la radiación puede juzgarse de la ecuación que gobierna la transferencia de calor de la flama a la carga:

$$Q = A \sigma \epsilon (T_f^4 - T_c^4)$$

Q = Flujo de calor hacia el clínker

A = Area total de intercambio de calor (área del volumen de la flama hacia el clínker, incluyendo la radiación y la rerradiación de las paredes).

σ = Constante de Stefan-Boltzman

ϵ = Emisividad efectiva de la flama

T_f = Temperatura media de la flama (absoluta).

T_c = Temperatura media de la superficie del clínker (absoluta).

Debido a los términos de temperatura que están elevados a la cuarta potencia y puesto que se involucran altas temperaturas de la flama en la zona de quemado y descarbonatación del horno, la transferencia de calor toma lugar casi exclusivamente por radiación.

Se encuentra por esta ecuación que la relación de transferencia de calor es muy sensible a la temperatura de la flama. Ya que la flama es tan importante, es conveniente considerar aquí algunas de sus propiedades.

3.- LOS FACTORES QUE AFECTAN LAS PROPIEDADES DE LA FLAMA.

- a) Exceso de aire
- b) Temperatura del aire secundario
- c) Cantidad de aire primario
- d) Temperatura del combustible
- e) Presión del combustible
- f) Ajuste del quemador

A continuación se verá la influencia y comportamiento - de cada uno de estos factores.

3.1. CANTIDAD DE EXCESO DE AIRE.

Siempre es necesario quemar el horno con un exceso de - aire mayor al requerido para la combustión, aunque este ex- ceso tiene un efecto diluyente en la flama y reduce su tempe- ratura, sirve para prevenir la formación de CO.

Normalmente el contenido de oxígeno a la salida del hor- no debe mantenerse entre 1 y 2%. Esto asegura que haya una - combustión completa del combustible y también que exista oxí- geno disponible para aumentar la cantidad de combustible --- cuando se requiera. Si el horno se opera con niveles de oxí- geno mayores del 2%, se incrementa el consumo de combustible y se reduce la producción.

Un aumento en el combustible, (habiendo oxígeno disponi- ble) sin otros cambios, tendrá los siguientes efectos:

Aumentará la energía calorífica total suministrada al - horno, pero también dará una alta temperatura de flama, debi- do a la disminución del contenido de oxígeno.

3.2. TEMPERATURA DEL AIRE SECUNDARIO.

Para una cantidad de combustible, con la misma cantidad de exceso de aire, es evidente que a mayor temperatura del -

aire de combustión, mayor será la temperatura de la flama. - De aquí se sigue que para obtener la flama más caliente para un horno de cemento, la cantidad de aire primario debe mantenerse al mínimo dentro de las especificaciones de diseño del quemador y al mismo tiempo reducir al mínimo las entradas de aire falso en la carátula, además de que el enfriador deberá operarse para obtener la temperatura más alta y constante de aire secundario.

El efecto de la temperatura del aire secundario en la temperatura de la flama es considerable; un cambio de 100°C en la temperatura del aire secundario resultará en un cambio en la flama de 70-75°C. Se ha demostrado que un cambio en la temperatura de flama de esta magnitud tiene un gran efecto - en la relación de transferencia de calor, así que por esta razón el enfriador deberá operarse dentro de lo posible en control automático, para mantener una operación estable del horno.

Es de utilidad considerar aquí el efecto del aire secundario en el horno, antes de que se mezcle con el combustible en la flama. Este aire secundario, aunque precalentado en el enfriador, es considerablemente más frío que la temperatura de la superficie del clínker y por lo tanto, enfriará el clínker por convección, esto es además del efecto de enfriamiento en la flama. Así que, el aire secundario -- que sea más frío de lo que debiera ser (debido a una operación deficiente del enfriador) y también el aire en exceso - del requerido para dar 2% de oxígeno a la salida del horno, tendrán un efecto doble al enfriar tanto la flama como el -- clínker y aumentará el consumo de combustible del horno.

3.3. CANTIDAD DE AIRE PRIMARIO.

Se ha demostrado que la cantidad de aire primario debe

mantenerse al mínimo posible, de acuerdo a los requerimientos de diseño del quemador.

El porcentaje de aire primario también tiene un efecto considerable pero no cuantificable, en la longitud de la flama.

Por estas razones la cantidad de aire primario no deberá utilizarse como un parámetro de control en la operación normal del horno.

3.4. TEMPERATURA DEL COMBUSTIBLE.

El combustible (combustóleo) que se utiliza es muy viscoso, por lo que, para hacerlo bombeable tiene que calentarse a 60-70°C, también tenemos que para atomizarlo eficazmente en el quemador, de manera que se mezcle con el oxígeno y se queme con suficiente velocidad, el combustible tiene que calentarse a temperaturas mucho mayores dependiendo de las características propias del combustible.

A temperaturas inferiores de 115°C, la flama será pobre, resultando condiciones reductoras, debido a que las gotas -- del combustible pobremente atomizado salpicarán el material dentro del horno, formándose además una flama larga, con la posibilidad de que haya combustión secundaria en el precalentador o bien se dañen las cadenas en los hornos de proceso húmedo.

3.5. PRESION DE COMBUSTIBLE.

En forma similar a la temperatura del combustible, si la presión de éste es muy baja, la atomización sufrirá los mismos efectos mencionados anteriormente. Pueden ocurrir variaciones de presión cuando la cantidad de combustible se aumenta o disminuye, pero deberá comprobarse que la presión -- permanezca dentro de las especificaciones del fabricante.

3.6. AJUSTES DEL QUEMADOR.

En la mayoría de los quemadores de petróleo existen mecanismos que nos permiten hacer grandes cambios a las características de la flama, estos cambios tienen un efecto considerable en el régimen de quemado del horno y aún más importante, en la vida del refractario.

Si se hacen cambios frecuentes en la flama, hará que el forro sea inestable, con resultado inevitable del daño al refractario. De lo anterior, es obvio que desde el punto de vista de la transferencia de calor de la flama, cualquier ajuste necesario para propósitos de control normal, únicamente deberán hacerse en la cantidad de combustible inyectado. Esta es la única variable que puede controlarse rigurosamente y la única de la cual podemos estar seguros de su efecto en el horno. En función de fijar una operación de horno estable y económicas todas las otras variables del quemador, deben mantenerse constantes dentro de lo posible.

La longitud de la flama óptima es aquella que sea lo suficientemente corta que proporcione la cantidad de calor necesario. Para completar la reacción de descarbonatación y elevar el material a temperatura de clinkerización y una flama no tan corta que dañe el refractario.

Aparte de las limitaciones impuestas por las características de flama en la transferencia de calor, hay una restricción posterior, debida a las propiedades térmicas de la cama del material dentro del horno. Esta tiene bajo coeficiente de conductividad térmica, así que el calor radiado de la flama no es llevado al interior de la cama. El resultado de esto es que una capa superficial delgada de material adquiere una temperatura bastante más alta que la del material general. La transmisión de calor acumulada en esta etapa hacia el resto del material se logra por medio de cierta clase de

"convección sólida" la cual toma lugar al ir cascadeando el material debido a la rotación de calor, este medio puede ser factor limitante en algunas zonas del horno.

Así que desde el punto de vista de transferencia de calor, el horno debe girarse a su máxima velocidad, pero como esto reduce el tiempo de residencia, la velocidad óptima para cualquier horno en particular tendrá que determinarse por experiencia. Sin embargo, hay que aclarar que cualquier cambio en velocidad hecho durante una operación normal, puede no únicamente alterar el balance entre las zonas de descarbonatación y clinkerización, sino que también alterar las características de transferencia de calor en varios puntos.

En los precalentadores Lepol la transferencia de calor es muy similar a la del enfriador de parrilla, en donde el aire transfiere su calor a los nódulos de material por convección. Entre mayor sea la cama de material (sin perder las propiedades de permeabilidad ni tener caídas de presión considerables) mayor será la transferencia de calor.

4.- TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN PRECALENTADOR DE SUSPENSION.

Este tipo de sistema permite obtener una producción alta y un bajo consumo de combustible debido a la alta eficiencia de transferencia de calor. Cabe mencionar que ésta alta eficiencia puede causar problemas principalmente con la recirculación de álcalis y cloruros, los cuales pueden acumularse y llegar a causar bloqueo.

Existen dos formas posibles de intercambio de calor entre los gases y el material en un precalentador, como lo son:

- La transferencia de calor en flujo paralelo.
- Transferencia de calor en flujo a contracorriente.

El flujo en paralelo se puede describir mejor si se con

sidera un tubo en el cual una corriente de material alimentada en conjunto con los gases calientes, se introducen por un extremo del tubo y son descargados por el otro. Si la longitud del tubo es suficientemente larga y la velocidad de los gases y el material es baja, entonces el material y los gases - saldrán del tubo a la misma temperatura. El resultado de este tipo de transferencia de calor es que se obtiene una temperatura común para los gases y el material. Para mostrar el sistema de intercambio de calor por contracorriente, se hará por medio de un tubo vertical en donde por la parte inferior se introducen gases calientes y por la parte superior se introduce el material. Las condiciones de intercambio de calor en este sistema son muy diferentes con respecto al sistema - de flujo en paralelo mencionado anteriormente, ya que el material alimentado será calentado gradualmente durante su trayectoria descendente, alcanzando una temperatura muy cercana a la temperatura de gases de entrada.

Es importante aclarar que en un precalentador de suspensión básicamente se utiliza un intercambio de calor de -- flujo paralelo; la eficiencia térmica es mejorada notablemente dividiendo este sistema de flujo paralelo en una serie de - paso individuales, conectados uno con otro en tal forma, que se obtiene una transferencia de calor muy parecida a la que se logra con un sistema de contracorriente.

La transferencia de calor dentro de un precalentador - de suspensión se efectúa en los ductos, siendo los ciclones únicamente un aditamento para separar el material de los gases.

La transferencia de calor dentro del precalentador es - mayor que la transferencia dentro del horno debido a que en el precalentador el material alimentado al ser arrastrado - por los gases forma una suspensión aumentando así el área -

de transferencia. Como la transferencia en esta zona es debida principalmente a la convección, en área tiene gran influencia en el resultado final, como se muestra en la ecuación siguiente:

$$Q = h_c A \Delta T$$

Q = Calor transferido por convección

h_c = Coeficiente de transferencia por convección

A = Area de transferencia

ΔT = Diferencia de temperatura entre la superficie del sólido y el fluido.

Debido a la gran importancia de este tipo de sistema -- los diseños modernos tienen quemadores dentro del mismo precalentador en donde el material con una descarbonatación de aproximadamente 90%.

5.- BALANCE DE CALOR.

Es conveniente el investigar en dónde y en que se está utilizando la energía calorífica que se suministra al sistema identificando así las pérdidas de calor más considerables. En ocasiones estas pérdidas pueden ser reducidas, lo que trae como beneficio una reducción en el consumo de combustible y un probable incremento de producción.

El balance de calor que a continuación se muestra es un ejemplo de un sistema con precalentador de cuatro etapas.

El balance se basa en la ley termodinámica de la conservación de la energía (el calor que entra al sistema es el mismo que sale).

Se toma como base un kilogramo de clínker y una temperatura ambiente promedio de 20°C. Se mencionan únicamente los

parámetros más importantes del balance.

CALOR SUMINISTRADO AL SISTEMA.

Consumo de combustible = 3300 l/h

Poder calorífico = 9500 Kcal/Kg

Densidad combustible = 0.931 Kg/l a 100°C

Producción de clínker = 32530 Kg/h

Por lo que el consumo de combustible es: 897 Kcal/Kg c.

CALOR UTILIZADO A LA SALIDA DEL SISTEMA.

Alimentación = 54 Ton/h

Factor mezcla cruda = 1.66

54 Ton/h = 32.53 Ton/h c.

= 32,530 Kg/h c.

= 9.04 Kg/seg c.

1.- Calor teórico de reacción, basado en la ecuación de Zur Strassenn.

$$Q = 2.2A + 6.48M + 7.646C - 5.116S - 0.59F$$

$$A = \%Al_2O_3 \text{ del clínker} = 3.60$$

$$M = \%MgO \text{ del clínker} = 0.70$$

$$C = \%CaO \text{ del clínker} = 59.58$$

$$S = \%SiO_2 \text{ del clínker} = 14.60$$

$$F = \%Fe_2O_3 + \%Mn_2O_3 = 1.80 + 0$$

$$Q = (2.2 \times 3.6) + (6.48 \times 0.7) + (7.646 \times 59.58) \\ - (5.116 \times 14.6) - (0.59 \times 1.8)$$

$$Q = 392 \text{ Kcal/Kg c.}$$

2.- Calor de los gases saliendo del horno.

2.1. Consumo de combustible.

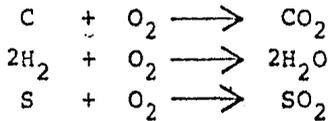
$$55 \text{ l/min} \times 60 = 3300 \text{ l/h}$$

$$\text{Densidad del combustible} = 0.931 \text{ Kg/l}$$

$$3,300 \text{ l/h} \times 0.931 \text{ Kg/l} = 3,072 \text{ Kg/h}$$

$$3,072/32,530 = 0.0944 \text{ Kg de combustible/Kg c.}$$

2.2. Reacciones de combustión.



Composición del combustóleo:

$$\text{C} = 86.6\%$$

$$\text{H}_2 = 10.23\%$$

$$\text{S} = 3.10\%$$

2.3. Composición en fracción peso de los gases de combustión.

$$0.0944 \times 0.866 \times 44/12 = 0.2998 \text{ Kg CO}_2/\text{Kg c.}$$

$$0.0944 \times 0.102 \times 36/4 = 0.0869 \text{ Kg H}_2\text{O}/\text{Kg c.}$$

$$0.0944 \times 0.031 \times 64/32 = 0.0059 \text{ Kg SO}_2/\text{Kg c.}$$

2.4. Oxígeno necesario para la combustión.

$$0.0944(0.866 \times 32/12 + 0.1023 \times 32/4 + 0.031) = 0.298 \text{ Kg O}_2/\text{Kg c.}$$

Relación N_2 : O_2 en aire = 3.31 : 1 en peso

$$0.298 \times 3.31 = 0.987 \text{ Kg de N}_2/\text{Kg c.}$$

2.5. Analisis de los gases de salida.

$$\text{CO}_2 = 26\%$$

$$\text{O}_2 = 2\%$$

$$\text{N}_2 = 72\%$$

Relación de N_2 : O_2 en aire = 3.76 : 1 en volumen

Cantidad de N_2 que representa exceso de aire

$$2 \times 3.76 = 7.52\%$$

Cantidad de N_2 debido al aire introducido para la combustión:

$$(72.0 - 7.52) = 64.48\%$$

Por lo tanto el % de exceso de aire es:

$$7.52/64.48 \times 100 = 11.66\%$$

Peso de N_2 en el aire de exceso

$$11.60/100 \times 0.987 = 0.1151 \text{ Kg } N_2/\text{Kg c.}$$

y el peso de oxígeno será

$$0.1151/3.31 = 0.034776 \text{ Kg } O_2/\text{Kg c.}$$

2.6. Vapor de agua proveniente del crudo.

Humedad del crudo = 0.8%

$$\frac{1.66 \text{ Kg alim./Kg c.} \times 0.8}{100 - 0.8} = 0.013 \text{ Kg agua/Kg c.}$$

2.7. Cantidad de CO_2 producido por la descarbonatción.



% $CaCO_3$ del crudo = 76.8%

pérdida por ignición del crudo - 33.8

$$100/(100 - 33.8) = 1.51 \text{ Kg crudo/Kg c.}$$

sin condiderar pérdida en polvo

$$1.51 \times 0.768 \times 44/100 = 0.51 \text{ Kg } CO_2/\text{Kg c.}$$

2.8. Agrupando valores:

H ₂ O producida por la combustión	0.0869 Kg H ₂ O/Kg c.
H ₂ O producida por la alimenta-- ción	0.013 Kg H ₂ O/Kg c.
	<hr/>
Σ	0.0999 Kg H ₂ O/Kg c.
CO ₂ producido por la combustión	0.2998 Kg CO ₂ /Kg c.
CO ₂ producido por la descarbona <u>a</u> ción.	0.51 Kg CO ₂ /Kg c.
	<hr/>
Σ	0.8098 Kg CO ₂ /Kg c.
SO ₂ producido por la combustión	0.0059 Kg SO ₂ /Kg c.
O ₂ del exceso de aire	0.035 Kg O ₂ /Kg c.
N ₂ producido por la combustión	0.987 Kg N ₂ /Kg c.
N ₂ producido por el exceso de aire	0.1151 Kg N ₂ /Kg c.
	<hr/>
Σ	1.102 Kg N ₂ /Kg c.

Calores específicos de estos compuestos a la temperatura de salida de los gases a 330°C.

$$C_p \text{ H}_2\text{O} = 0.480 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$C_p \text{ CO}_2 = 0.260 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$C_p \text{ O}_2 = 0.240 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$C_p \text{ N}_2 = 0.255 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$C_p \text{ SO}_2 = 0.190 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

2.9. Calor necesario para elevar la temperatura de los gases de 20 a 330°C.

$$Q = 310 (0.0999 \times 0.48) + (0.8098 \times 0.26) + (0.035 \times 0.024) \\ + (1.102 \times 0.255) + (0.0059 \times 0.19)$$

$$Q = 170 \text{ Kcal/Kg c.}$$

3.- Calor sensible de la evaporación del agua.

$$(1.66 \times 0.8)/(100 - 0.8) = 0.0134 \text{ Kg agua/Kg c.}$$

Calor latente de evaporación = 586 Kcal/Kg

$$0.0134 \times 586 = 7.85 \text{ Kcal/Kg c.}$$

4.- Calor saliente del enfriador.

Gasto de aire saliente del enfriador = 16.52 N m³/s

Temperatura de los gases salientes del enfriador = 210°C.

Densidad del aire = 1.2928 Kg/m³ a 0°C y 760 mm Hg

$$16.52 \times 1.2928 = 21.35 \text{ Kg/s de aire a } 0^\circ\text{C}$$

$$21.35 \times 273/583 = 9.99 \text{ Kg/s de aire a } 210^\circ\text{C}$$

Referido al clínker:

$$9.99/9.04 = 1.1059 \text{ Kg aire/Kg c.}$$

C_p del aire a 210°C = 0.245 Kcal/Kg °C

$$Q = 1.1059 \times 0.245 (210 - 20) = 51.5 \text{ Kcal/Kg c.}$$

5.- Pérdida de calor en el polvo que sale del sistema.

Pérdida de polvo = 4,320 Kg/h

$$4,320/32,530 = 0.133 \text{ Kg polvo/Kg c.}$$

C_p del polvo = 0.21 Kcal/kg °C

$$Q = 0.133 \times 0.21 (330 - 20)$$

$$Q = 8.66 \text{ Kcal/Kg c.}$$

6.- Pérdidas de calor en el clínker saliente del enfriador.

C_p del clínker de 0 a 200°C = 0.198 Kcal/kg °C

$$Q = 1 \times 0.198 (128 - 20)$$

$$Q = 21.4 \text{ Kcal/Kg}$$

7.- Pérdida por radiación del sistema.

por la coraza = 86 Kcal/Kg c.

por el precalentador = 57 Kcal/Kg c.

por el enfriador = 7 Kcal/Kg c.

Estos valores se obtienen de la aplicación de la ecuación de Stefan-Boltzman, mencionada anteriormente

8.- Agrupando los resultados obtenemos los porcentajes y gas total de energía calorífica.

Calor suministrado al sistema	= 837 Kcal/Kg c.	100%
Calor utilizado saliente del sistema:		
Calor de reacción	= 392 Kcal/Kg c.	47%
Calor saliente del sistema en los gases	= 170 Kcal/Kg c.	20%
Calor sensible a la evaporación del agua	= 8 Kcal/Kg c.	1%
Calor saliente por el enfriador	= 50 Kcal/Kg c.	6%
Calor saliente en el polvo	= 9 Kcal/Kg c.	1%
Calor saliente en el clínker	= 21 Kcal/Kg c.	3%
Calor perdido por radiación	= 150 Kcal/Kg c.	18%
Otros	= 37 Kcal/Kg c.	4%
TOTAL	= 837 Kcal/Kg c.	

CONSERVACION DE LA ENERGIA

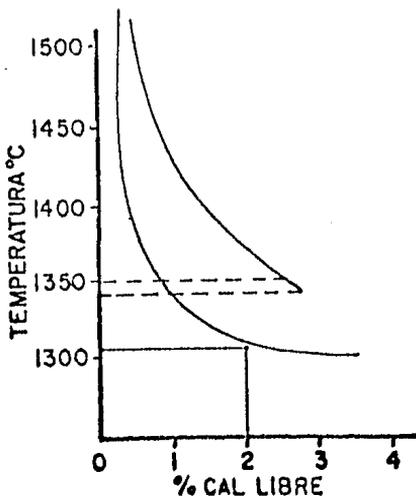
1.- INTRODUCCION.

El tema central de esta tesis es como manejar todos -- los parámetros químicos, fisicoquímicos y operacionales en la producción de clínker, manteniendo al máximo posible la conservación de la energía. Al hablar sobre la conservación de la energía, se hace específicamente sobre el consumo de energéticos, ya sea gas natural o combustóleo. Se observa, -- que al trabajar sobre todos los lineamientos aquí expuestos, se tiene un ahorro en el consumo de energéticos al poder conservar la energía calorífica dentro del horno (y en todo el sistema de calcinación), esto trae como consecuencia la producción de un clínker de buena calidad a costos rentables.

2.- REGIMENES DE CALENTAMIENTO.

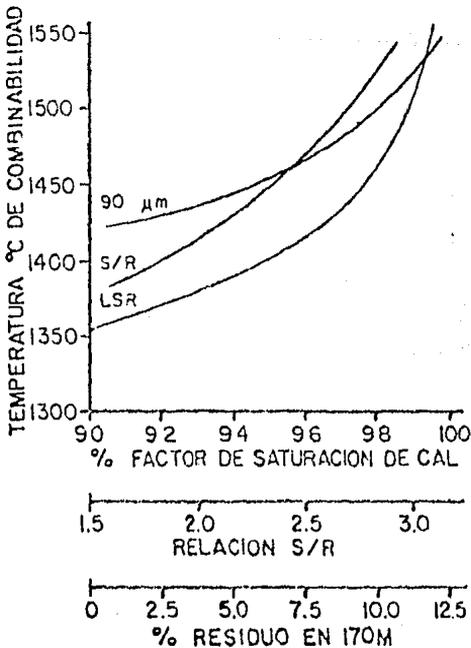
La temperatura de combinabilidad es definida arbitrariamente como la temperatura necesaria para obtener un clínker contenga un 2% de cal libre. La figura 2.1 muestra el tipo de curvas resultantes de las temperaturas de calcinación contra la cal libre obtenida.

Fig: 2.1 Curvas típicas de combinabilidad



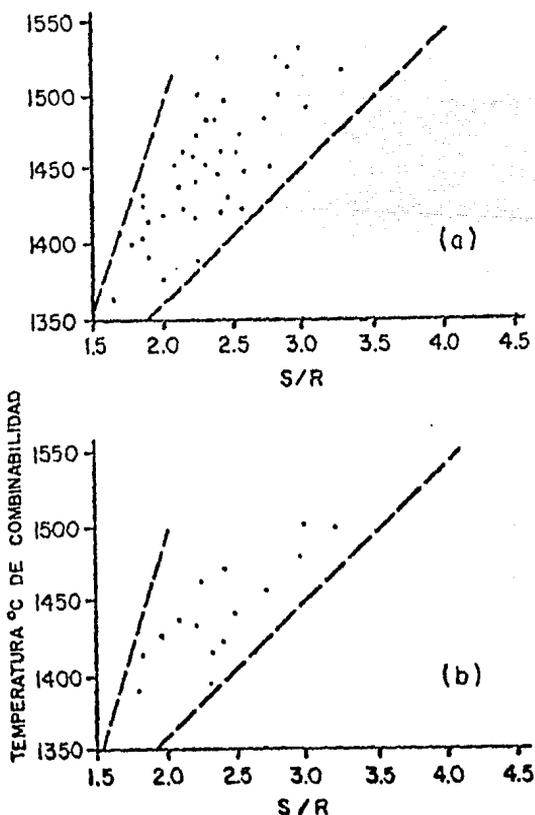
La configuración de las curvas de combinabilidad varía con la composición y finura. En la figura 2.1 por ejemplo, - la curva superior muestra un decrecimiento constante en la cal libre cuando la temperatura de calcinación es aumentada desde 1350°C a 1450°C ; mientras que en la curva inferior -- puede notarse que para controlar la cal libre a niveles de - 2% la temperatura debe ser controlada estrictamente; un pequeño cambio en la temperatura es acompañado por un gran cambio en la cal libre. Al mencionar la variación de las curvas de combinabilidad por el efecto de la composición, en la figura 2.2 se muestra que los aumentos en el FSC, S/R y el residuo de alimentación provocan dificultades de combinación.

Fig: 2.2 Efectos del FSC, S/R y residuo de alimentación sobre la temperatura de combinabilidad, en 170 M.



De la fig: 2.2 se puede observar claramente, que a cualquier relación de sílice, S/R, o alúmina A/F, la temperatura de combinabilidad de la mezcla de 100% de FSC es sustancialmente mayor que la mezcla con 90% de FSC.

La figura 2.3a muestra la dispersión de temperaturas de combinabilidad diferentes mezclas, graficadas contra la relación S/R teniendo un FSC y residuos constantes. En la figura 2.3b se muestra que la dispersión no es afectada por el rango A/F (1.1 - 2.8) el cual es reducido a 1.8 - 2.2. La dispersión casi no es afectada y se considera que esto se debe a la forma en que está presente la sílice.



3.- EFECTO DE LOS MINERALIZANTES Y CONSTITUYENTES VOLATILES SOBRE LA COMBINABILIDAD.

Existen mineralizantes los cuales aumentan la fase líquida y/o alteran las características de la viscosidad; ambos dan como resultado una mejor quemabilidad. Sin embargo en el caso del MgO y los álcalis, su basicidad y su comportamiento de sustitución de cal pueden lograr un aumento total en la basicidad de la mezcla y como resultado hacen más difícil la combinabilidad, particularmente con FSC en los alrededores del 100%. Debido a su combinación preferente con el SO_3 el efecto básico de los álcalis puede ser neutralizado asegurando una suficiencia de SO_3 para formar los sulfatos alcalinos en el sistema. Los factores de alta retención, junto con el azufre del combustible, en procesos de alta eficiencia térmica frecuentemente provocan esa situación.

Se hace también una contribución a la fase líquida por el SO_3 en conjunto con los álcalis como sulfatos alcalinos y con la abundante cal presente, como sulfato de calcio. Mientras esta fase líquida es diferente del fundente normal, la que forma el C_3A y el C_4AF es sin embargo efectiva, facilitando la actividad iónica y la combinación. En consecuencia es obvio que la carga circulada de SO_3 sobre la mezcla cruda --descarbonatada es para formar CaSO_4 y éste junto con el CaO formará un fundente eutéctico a una temperatura en la región de los 1200°C . Con la presencia del K_2SO_4 , el CaSO_4 también producirá fases que son líquidas a temperaturas tan bajas como 270°C . Habiendo realizado su trabajo, el de facilitar la integración de los componentes del clínker, una porción de los sulfatos alcalinos, principalmente el K_2SO_4 , se volatilizarán en la zona de calcinación y se recircularán a la entrada del horno o al precalentador. El CaSO_4 aunque no se diso-

cia completamente en CaO, el cual llegará a ser integrado - en el clínker, y el SO₃ se recirculará a la entrada del horno o al precalentador. Con excepción de lo perdido por la recuperación del precipitador o lo que escapa por la chimenea, los sulfatos serán retomados por la alimentación y de nuevo estarán disponibles para realizar su acción mineralizante.

4.- INFLUENCIA DE LA COMPOSICION EN LA CALIDAD DEL CEMENTO.

Se han hecho pruebas para obtener alguna correlación entre los componentes potenciales, cal libre o cal combinada y resistencias. Los trabajos han demostrado que ninguno de estos factores es tan importante como los regímenes de calcinación a los cuales el clínker ha sido sometido. Esto se ilustra en la tabla 4.1 donde las mismas mezclas crudas han sido sometidas a diferentes condiciones de calcinación.

Tabla 4.1 Efecto del aumento de temperatura/tiempo en el régimen de calcinación sobre la cal libre, cal de -- combinación y calidad a FSC = 97%.

Temp./tiempo (°C/h)	1350/1	1350/2	1400/1	1450/1	1500/1	1500/2
% Cal libre	6.1	3.1	3.0	2.8	1.6	1.0
FSC	87.8	92.3	92.5	92.8	94.7	95.7
Resistencias (Kg/cm ²)						
3 días	190	200	185	170	165	160
7 días	265	280	295	290	270	255
28 días	360	415	405	445	405	425

Estas series muestran un decrecimiento de las resistencias con un aumento de la combinación; al contrario de lo -- que generalmente se podría esperar. Un quemado más suave conduce a un mejoramiento en la calidad. Es de notarse que una cal libre excesiva ha bajado la resistencia a 28 días. Generalmente, siempre y cuando la cal libre no exceda mucho de - 3.0%, las resistencias a 28 días no deberían ser afectadas - ni debería haber problemas de expansión.

De los resultados se concluye que el régimen de calcinación puede ser de mayor importancia que la composición.

5.- RELACION DE LA CALIDAD DEL CEMENTO CON LA ESTRUCTURA CRISTALINA DEL CLINKER.

Las resistencias producidas cuando el cemento es mezclado con agua, resultan de la hidratación del C_3S o alita; el grado de hidratación está relacionado por el contacto del agua con la superficie disponible y la reactividad intrínseca de los materiales cristalinos. Esta última propiedad probablemente depende de la estructura del cristal y se ha muestrado que el tamaño de éste tiene una importante influencia sobre la reactividad.

En una determinada mezcla a más alta temperatura es menos viscoso el líquido fundente y por lo tanto más rápida la disolución de cal y sílice y la precipitación de los cristales de C_3S . Entre más tiempo estén los cristales en contacto con el fundente serán más grandes. Exámenes microscópicos de clíinker han demostrado que la temperatura tiene una marcada influencia en el tamaño de los cristales y el tiempo de calcinación, aunque menos significativa, también hace crecer los cristales, produciendo cristales grandes de C_3S a expensas - de la calidad del cemento. Sin embargo, hay una importante

limitación que debe ser comprendida. Cuando un clínker es se veramente sobrecalcinado se producen cristales muy pequeños de C_3S , pero a falta de combinación hay considerablemente me nos C_3S de lo potencialmente presente. Lo que se requiere es el desarrollo de la máxima cantidad de cristales de alita pe queños, muy activos y mal formados. La resistencia óptima ocurre con la máxima cantidad de cristales pequeños; la alta temperatura aumenta la combinación, pero también aumentan -- los cristales de C_3S en perjuicio de la calidad. Con una mez cla de FSC bajo y cal libre se puede obtener una mejor calidad de cemento que con un FSC alto.

6.- EL EFECTO DEL GRADO DE ENFRIAMIENTO SOBRE LA ESTRUCTURA DEL CLINKER.

El clínker, cuando es enfriado rápidamente, produce una fase uniforme con pequeños cristales de C_3A y C_4AF , mientras que si el clínker es enfriado lentamente, los cristales es tán bien definidos y fácilmente visibles. Los componentes -- que bajo condiciones de enfriamiento rápido permanecen en so lución sólida en el fundente, tienden a ser desalojados de -- la solución por el enfriamiento lento. Por difracción de ra yos X se ha mostrado que la alúmina es retenida en solución sólida dentro del C_3S por un rápido enfriamiento; pero bajo condiciones de enfriamiento lento el fundente cristaliza; -- los silicatos son parcialmente liberados; las soluciones son esparcidas; las composiciones modificadas, los cristales de C_3S ceden cal al fundente y se degradan a C_2S cuando la fase líquida en clínkeres de alta relación A/F es deficiente en -- cal.

7.- FINURA DEL CRUDO.

La finura del crudo es probablemente el factor individual más importante que influye sobre la calidad del cemento. Manteniendo todas las demás condiciones constantes, entre mayor sea la finura del crudo más baja será la temperatura de combinabilidad del clínker y más pequeños los cristales de C_3S . La facilidad con la cual las partículas se combinan dependen de su finura, composición y naturaleza mineralógica.

8.- RESUMEN DE LOS INCISOS DEL 1 AL 7.

La tabla 8.1 muestra el efecto perjudicial de la calcinación a alta temperatura y los beneficios que se obtienen usando una mezcla finamente molida.

Con el residuo en la mezcla cruda original de 5% sobre la malla 170 no hay mejora en las resistencias de tres días con un FSC arriba de 94% y solamente una ligera mejora en edades posteriores. Cuando el residuo disminuye, el FSC puede ser aumentado hasta un máximo de 97% obteniéndose mejoras en la calidad. Más allá del 97% de FSC no se obtiene mejora alguna.

Se ha demostrado en todos los incisos anteriores que --trabajando los parámetros dentro de sus rangos se obtiene un clínker (y cemento) de buena calidad. Y en todo el sistema de calcinación se puede obtener una conservación de energía calorífica, ya que se mantiene estable el sistema por no realizar demasiados movimientos operativos y de esta manera no descontrolar el sistema de calcinación, aunando a esto un ahorro de combustible.

Tabla: 8.1 Efecto del FSC, finura y temperatura de calcinación en la calidad del cemento.

FSC	91		94		97		100			
Residuo %										
170 M	4.7	4.7	3.0	1.0	4.7	3.0	1.0	4.7	3.0	1.0
100 M	2.4	2.4	1.3	0.3	2.4	1.2	0.3	2.4	1.2	0.3
50 M	0.6	0.6	0.2	0.6	0.6	0.2	-	0.6	0.2	-
T comb °C	1390	1420	1405	1375	1480	1450	1425	1550	1515	1500
T cal. °C	1380	1405	1390	1370	1450	1435	1415	1500	1500	1480
Cal libre %	2.2	2.2	2.2	2.2	3.2	2.2	2.2	3.0	2.7	2.2
Resist. Comp. (Kg/cm ²)										
3 días	150	170	175	180	165	170	195	150	175	175
7 días	225	255	265	270	260	270	280	260	265	270
28 días	375	380	405	420	395	415	425	395	410	415

9.- COMBUSTIBLES.

El combustible es uno de los artículos más costosos en la fabricación del cemento, es por ello que se debe tratar - al máximo preservar la energía calorífica en todo el sistema de calcinación.

Propiedades físicoquímicas estándar de los combustibles.

COMBUSTOLEO.

1.- Composición química, porcentos en peso.

Carbono	86.60
Hidrógeno	10.23
Oxígeno	0.03
Nitrógeno	0.04
Azufre	3.10

2.- Poder calorífico, en Kcal/Kg

Alto (gross)	10,000
Bajo (net)	9,500

3.- Gravedad específica (adimensional)

a 20°C	0.96
a 100°C	0.932

GAS NATURAL

1.- Composición química, porcentos en volumen.

Metano	91.80
Etano	6.90
Propano	1.30

2.- Poder calorífico, en Kcal/m³, a 20°C y 1 Kg/cm²

Alto (gross)	9,370
Bajo (net)	8,460

3.- Densidad.

$$\rho = 0.694 \text{ Kg/m}^3 \text{ a } 20^\circ\text{C y } 1 \text{ Kg/cm}^2.$$

AIRE

1.- Composición química.

Masa	1 Kg aire = 0.23 Kg O ₂ + 0.77 Kg N ₂	3.31 : 1
Volumen	1 m ³ aire = 0.21 m ³ O ₂ + 0.79 m ³ N ₂	3.76 : 1

2.- Densidad.

$$\rho = 1.2928 \text{ Kg/m}^3 \text{ a } 0^\circ\text{C y } 760 \text{ mm Hg}$$

3.- Calor específico (Cp), Kcal/m³°C, como función de la temperatura en °C.

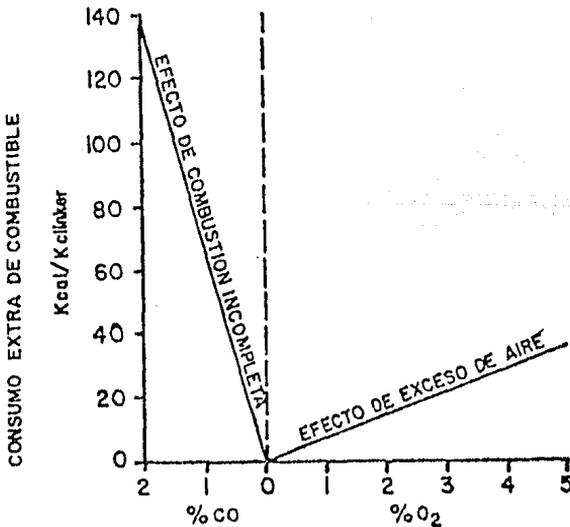
Temperatura	Cp
0	0.31
100	0.312
200	0.317
300	0.323

Es importante recalcar aquí que el combustible utilizado en la República Mexicana proviene de diferentes regiones, sus poderes caloríficos permanecen relativamente constantes y semejantes entre sí. El gas natural tiene poder calorífico variable según sea la disponibilidad por parte de Pemex.

En la combustión las reacciones normalmente se llevan a cabo rápidamente y a temperaturas elevadas. La eficiencia en el uso del calor depende del método de control de combustión y el procedimiento por el cual se aplique el calor. Es por esto que se debe de mantener el horno lo más estable posible, para no producir pérdidas de energía calorífica.

Un pequeño porcentaje de monóxido de carbono en los gases de salida representa pérdidas de calor considerables debido a la combustión incompleta. Esto se muestra en la figura 9.1.

Fig: 9.1 Efectos de combustión incompleta y exceso de aire en el consumo de combustible.



10.- TRANSFERENCIA DE CALOR.

La función principal de un horno rotatorio es la de transferir el calor de la combustión a la alimentación y así llevar a cabo la reacción química para formar el clínker. La

cantidad de calor a ser transferida y el grado de transferencia determinan la velocidad de fabricación del clinker. La cantidad de calor que se transfiere por kilogramo de clinker depende de ciertos parámetros. Existen varios factores con los que se puede reducir el consumo de combustible, como lo es la reducción de humedad en el proceso húmedo, una flama óptima, una temperatura de aire secundario lo más alta y -- constante posible, etc.

En términos generales, el grado de transferencia aumenta conforme aumenta el área efectiva del material en contacto con el gas, aumenta la diferencia de temperaturas entre el gas y el material y aumentan los coeficientes de transferencia de calor en varias de las interfases.

En un horno de proceso húmedo o en un horno largo y seco, el área superficial en las zonas menos calientes está determinada por el sistema de cadenas o por los intercambiadores, levantadores, etc. En las zonas calientes y a lo largo de los hornos cortos, el área está determinada por la geometría del horno. La temperatura de gas en la zona de clinkerización depende en gran parte de la temperatura del aire secundario. El grado de transferencia de calor del gas a la superficie de la carga depende de la emisividad y velocidad de los gases. Para las zonas de clinkerización la temperatura es debida principalmente a la radiación, por lo tanto al aumentar la emisividad de la flama mejora la transferencia de calor en la zona.

La transferencia debida a la convección aumenta la importancia en las zonas menos calientes y ésta se incrementará conforme la velocidad de los gases sea mayor. Cálculos teóricos indican que el grado de transferencia de calor dentro de la cama de material es tan importante como la transferencia del gas a la superficie del material, esto solo en al

gunas zonas del horno. Esta transferencia de la carga de material está influenciada por la profundidad de éste y el grado de movimiento de la carga, ambos dependen de la velocidad e inclinación del horno, tamaño de partícula y la presencia de fundentes.

La transferencia de calor ha sido el factor que controla la reacción química del material que va dentro del horno. Pero la temperatura final del material depende de la composición y naturaleza de la alimentación y la finura de dicho material.

Es obvio que el control del horno es un factor muy importante en la alta productividad del mismo con una calidad consistente y aceptable del clinker.

11.- CONSERVACION Y AHORRO DE ENERGIA.

11.1. CONSERVACION.

Se debe entender que la conservación de la energía sucede en cualquier proceso de la naturaleza y sólo a partir de éste principio tiene validéz la termodinámica.

A una escala absoluta se puede decir que la cantidad de energía total en el universo es constante y solo sufre transformaciones. Cuando se aplica el enunciado anterior a un proceso industrial se puede decir que la suma de las energías de entrada al sistema, más las de salida, más las energías de reacción debe ser siempre cero.

Si en el caso particular del proceso del cual se ocupa ésta tesis usamos los conceptos básicos citados anteriormente, podemos obtener el balance térmico del cual se ha hablado abundantemente en el capítulo anterior.

11.2. AHORRO.

No debe confundirse ahorro de energía con conservación de la misma.

La principal diferencia se encuentra en que mientras que la conservación de energía es un proceso natural, el ahorro de energía es un proceso en el cual debe intervenir el hombre.

Podríamos definir el ahorro de energía como el uso óptimo y económicamente viable del contenido energético del proceso, el cual incluye combustibles, reacciones y cualquier otra forma de energía utilizada en él.

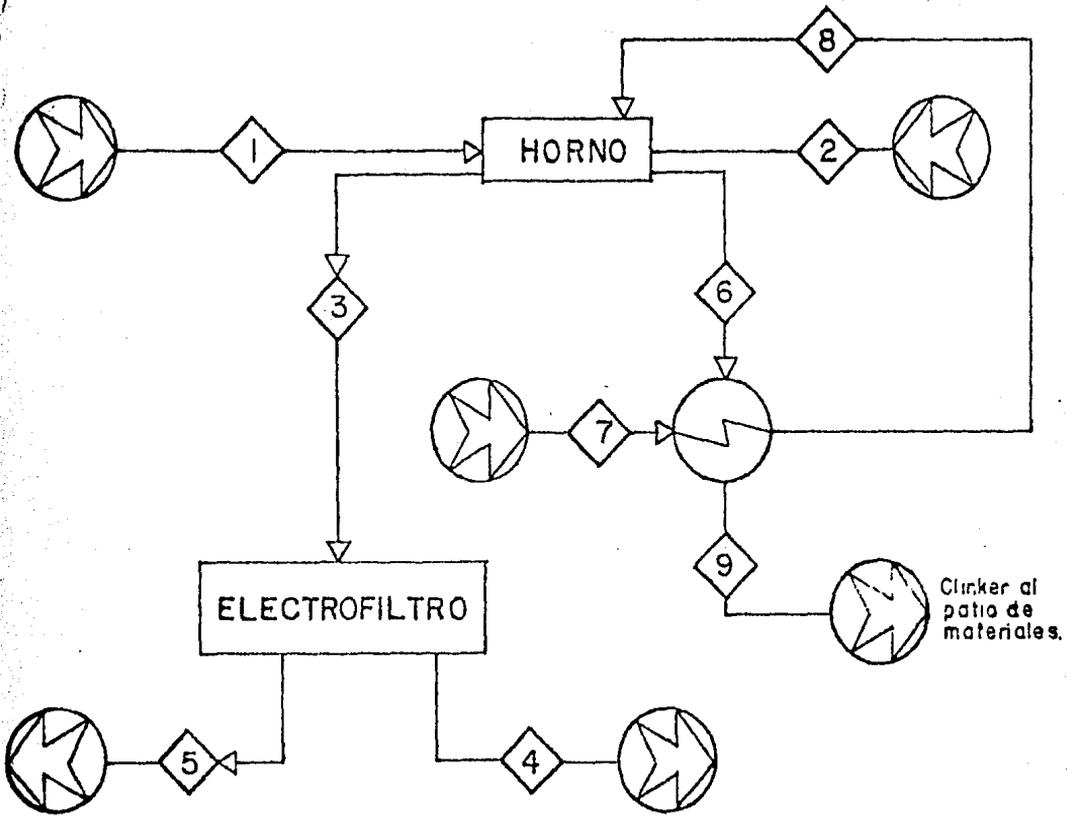
Es labor del ingeniero químico hacer un uso óptimo de la energía en los procesos industriales ya que los costos de ésta aumentan constantemente con el tiempo.

11.3. AHORRO Y CONSERVACION DE LA ENERGIA EN LA PRODUCCION DEL CLINKER.

Habiendo quedado claro que la conservación de la energía se da en todos los procesos (y desde luego en la producción de clínker), veremos ahora como se logra un ahorro efectivo en el proceso. Para ello es necesario remitirse a las figuras 11.1 a 11.3.

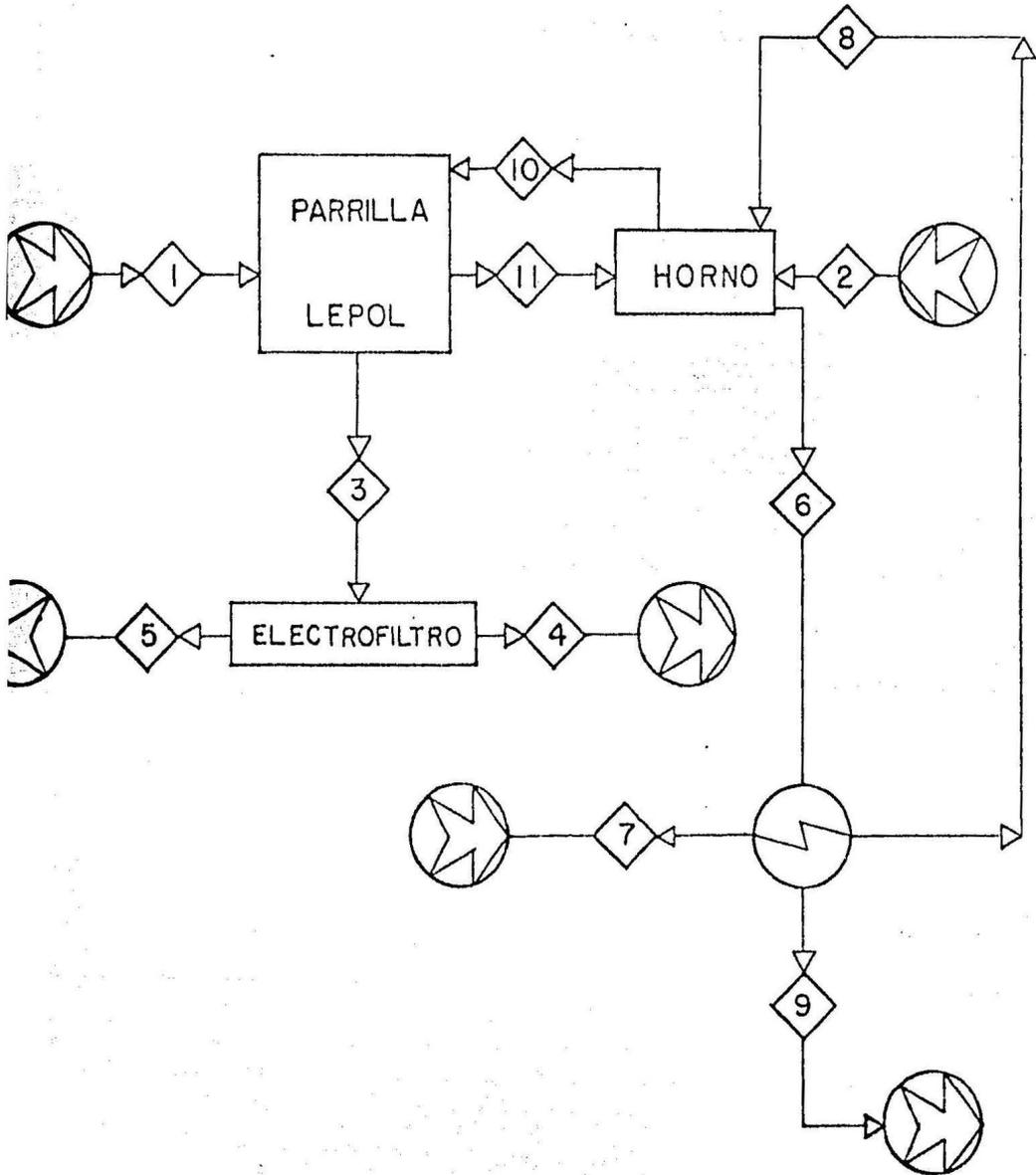
No se ampliará aquí más el concepto de ahorro y conservación de energía debido a las variaciones de las diferentes relaciones que determinan la calidad y composición del clínker, ya que fueron estudiadas ampliamente en secciones anteriores. Nos remitiremos a estudiar las eficiencias cualitativas de los diferentes arreglos físicos del proceso.

Fig. II I PROCESO HUMEDO



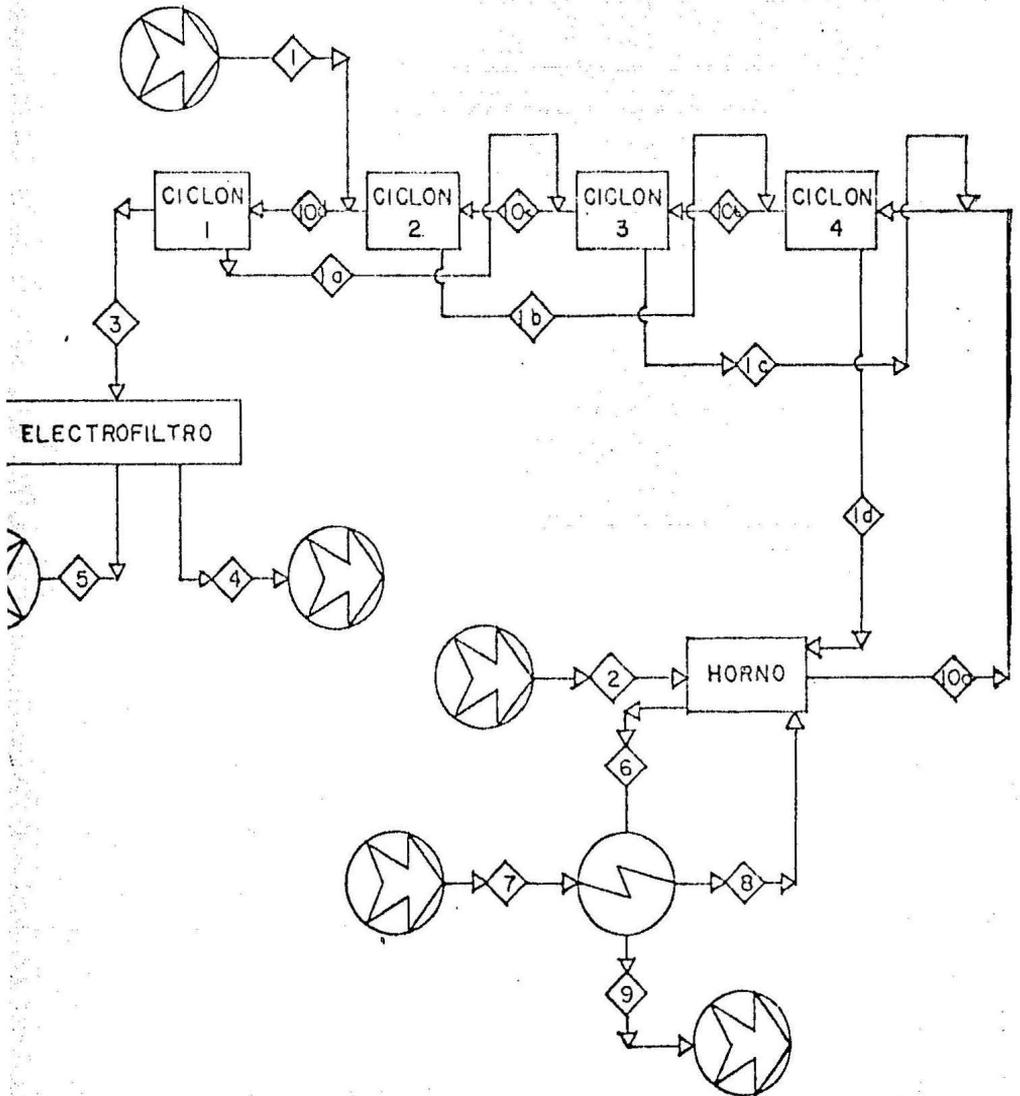
- 1 Pasta de materia prima a temperatura ambiente de bulbo húmedo.
- 2 Combustible precalentado a 130-160°C (combustóleo) o gas natural a temperatura ambiente.
- 3 Aire caliente más polvos arrastrados, a 175°C.
- 4 Aire filtrado a la atmósfera.
- 5 Polvos de desperdicio.
- 6 Clínker caliente a 700°C.
- 7 Aire ambiental a 20°C.
- 8 Aire caliente a 450°C.
- 9 Clínker a 100°C al patio de materiales.

II.2 PROCESO SEMI-SECO



- ① Nódulos
- ② Combustible precalentado a 130-160°C (combustoleo) o gas natural a temperatura ambiente.
- ③ Aire caliente más polvos arrastrados a 110°C,
- ④ Aire filtrado a la atmósfera,
- ⑤ Material de desperdicio.
- ⑥ Clínker caliente a 700°C,
- ⑦ Aire ambiental a 20°C,
- ⑧ Aire caliente a 600°C,
- ⑨ Clínker a 100°C,
- ⑩ Aire caliente del horno a 1000°C,
- ⑪ Material descarbonatada a 800°C,

Fig. 11.3 PROCESO SECO



- ① Alimentacion de crudo.
- ①a Salida de material de la cuarta etapa a 805°C.
- ①b Salida de material de la tercera etapa a 665°C.
- ①c Salida de material de la segunda etapa a 505°C.
- ①d Salida de material de la primera etapa a 315°C.
- ② Combustóleo a 130-160°C o gas natural a temperatura ambiente,
- ③ Salida de aire a 345°C.
- ④ Aire filtrado a la atmósfera.
- ⑤ Material de desperdicio.
- ⑥ Clínker caliente a 700°C.
- ⑦ Aire ambiental a 20°C.
- ⑧ Aire caliente a 600°C.
- ⑨ Clínker a 100°C
- ⑩a Gas de salida del horno a 1100°C,
- ⑩b Gases a 825°C.
- ⑩c Gases a 705°C.
- ⑩d Gases a 545°C.

11.3.1 PROCESO HUMEDO.

En el proceso representado por la figura 11.1 las pérdidas de energía son considerables ya que el horno recibe toda la carga térmica en una sola etapa. El aire de salida del --horno se encuentra aún a alta temperatura (175°C), y es descargado a la atmósfera sin que se le dé un uso posterior.

Este proceso es cada vez menos utilizado, porque si ---bien la calidad del clínker es buena, el consumo de energía es alto.

11.3.2 PROCESO SEMISECO.

Representado por la figura 11.2 es un proceso en tres etapas, por lo cual tiene un mayor ahorro de energía. Dos de las etapas son proporcionadas por la parrilla Lepol y la tercera por el horno, como se describe a continuación:

La parrilla Lepol consiste en una banda sin fin que circula a través de una coraza dividida en dos secciones por --una mampara.

El aire circula a través de cada una de las dos secciones a flujo cruzado. En la segunda etapa el material es descarbonatado con el aire caliente (1000°C) que viene del horno; este aire se enfría al descarbonatar (recordar que la --reacción es endotérmica) y pasa entonces a la primera etapa, donde aún caliente seca el material alimentado.

El proceso de la tercera etapa ya ha sido ampliamente -descrito.

11.3.3 PROCESO SECO O DE PRECALENTADOR DE SUSPENSION.

Es un proceso en cascada en n etapas, la última de las cuales es el horno mismo.

El material en polvo es alimentado entre la primera y -la segunda etapa a la tubería que transporta el aire prove--

niente de la segunda, fluyen en paralelo hasta la primera, - donde se separa el polvo del aire; el aire se descarga a los filtros mientras que el polvo se alimenta a la tubería de ai re entre la segunda y la tercera etapa, donde es arrastrado en paralelo hacia la segunda y nuevamente son separados, repitiéndose el proceso hasta que finalmente el polvo es ali- mentado al horno (última etapa).

Para que el proceso resulte costeable se ha encontrado que el número óptimo de etapas es cinco: cuatro precalentado res y el horno.

COSTOS

1.- INTRODUCCION.

Se sabe que habiendo demanda y teniendo un producto de buena calidad para satisfacer esa demanda, la utilidad de una empresa depende de:

- Volumen de producción y/o venta.
- Precio de venta del producto.
- Costo de fabricación y
- Gastos de operación de la empresa.

El volumen y el precio de venta del producto determinan los "ingresos" y los costos de fabricación más los gastos de operación determinan los costos totales y así:

$$\text{UTILIDAD} = \text{INGRESOS} - \text{COSTOS}$$

2.- COSTOS.

Los costos se pueden dividir, según su naturaleza, en:

2.1. COSTOS FIJOS = F

Son aquellos que ocurren independientemente del volumen de producción, tales como:

- Sueldos y salarios del personal de planta.
- Prestaciones legales y contractuales del personal.
- Cargo por depreciaciones de los activos de la empresa.
- Gastos fijos de administración y ventas.

2.2. COSTOS VARIABLES = V

Son aquellos que están directamente ligados a la producción los que ocurren en función de los volúmenes producidos.

Estos a su vez, podemos dividirlos en grupos de acuerdo a su naturaleza e importancia como sigue:

- a) Mano de obra variable:
 - Tiempo extra trabajado.
 - Personal eventual (salarios y prestaciones).
 - Remuneración complementaria.
- b) Materias primas compradas:
 - Correctores de fierro y sílice.
 - Yeso
 - Puzolana
 - Caliza
 - Arcilla
 - Caulín, etc.

y los gastos de flete y maniobras relacionadas con los mismos.

- c) Energéticos:
 - Combustóleo
 - Gas
 - Energía eléctrica
- d) Materiales:
 - Explosivos
 - Refractario
 - Bola y placa de molinos
 - Combustibles y lubricantes
 - Materiales y refacciones de mantenimiento.
- e) Gastos:
 - Por servicios técnicos.
 - Por servicios contratados.
 - Honorarios a terceros, etc.

3.- COSTO DE PRODUCCION DE CLINKER.

3.1. METODO DE EVALUACION UTILIZADO:

Precios promedio: Consiste en considerar como costo de

ventas, el importe que resulte como promedio de los costos - de adquisición de las mercancías compradas a diferentes costos. Así como también el promedio de los gastos de operación. Los costos son llevados a el año de 1983.

CANTERA:

EXPLOTACION CALIZA.	IMPORTE M\$.
Operación	1794 2
Mantenimiento	536
Control de calidad	504
Costo de producción	<u>2834</u>

CARGA, ACARREO Y TRITURACION DE CALIZA.

Operación	3698 2
Mantenimiento	6379
Costo de producción	<u>10077</u>

PREHOMEGENEIZADO.

Operación	2187 2
Maantenimiento	1511
Costo de producción	<u>3698</u>

PRODUCCION DE CLINKER:

MOLIENDA DE CRUDO.

Operación	4862 1
Mantenimiento	5799
Control de calidad	216
Costo de producción	<u>10877</u>

CALCINACION.

Operación	25143 1
-----------	---------------

Mantenimiento	19165
Control de calidad	288
Servicios generales	25317
Costo de produccion	<u>69913</u>

1 CALCINACION.

GASTOS DE OPERACION	IMPORTE M\$	\$/TON
Mano de obra fija	4083	61.68
Mano de obra variable	255	3.84
Refractario	2877	43.35
Gas	2732	41.17
Energía eléctrica	3163	47.66
Materiales de operación	16885	254.44
Total	<u>30005</u>	<u>452.14</u>

2 CANTERA.

GASTOS DE OPERACION		
Mano de obra fija	3198	48.19
Mano de obra variable	87	1.31
Materias primas	975	14.69
Llantas	551	8.30
Explosivos	812	12.24
Aceites y lubricantes	718	10.84
Diesel	938	14.13
Materiales de operación	400	6.03
Total	<u>7679</u>	<u>115.71</u>

RESUMEN.

Clínker producido = 66362 Ton.

CANTERA

Explotación de caliza	2834	42.71
Carga, acarreo y trituración de caliza	10077	151.85
Prehomogeneizado	<u>3698</u>	<u>55.72</u>
Total	16609	250.28

PRODUCCION DE CLINKER

Molienda de crudo	10877	163.90
Calcinación	<u>69913</u>	<u>1053.51</u>
Total	80790	1217.41

CANTERA	16609	250.28
PRODUCCION DE CLINKER	<u>80790</u>	<u>1217.41</u>
COSTO DE PRODUCCION	97399	1467.69

ANALISIS DE RESULTADOS

1.- Se entiende por cemento Portland, una clase de cemento hidráulico cuyos principales componentes son dos silicatos de calcio: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ y $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. La alúmina y el hierro de las materias primas forman principalmente $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, y una solución sólida de composición parecida a
 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

2.- Para la fabricación del cemento, se precisa pues, de los elementos: calcio, silicio, aluminio e hierro. Las rocas y los minerales constituyen entonces, el grueso de las materias primas para la industria del cemento. Las cuales son:

- a) Materias calcáreas: Caliza (dura), con bajo contenido en humedad y alta potencia para molienda. Apropiada en particular para procesos secos y semisecos.
- b) Materiales arcillosos: arcilla, material blando, a menudo con un alto contenido de humedad. Por ello se emplea muchas veces como pasta para el proceso húmedo en los molinos de crudo.
- c) Otros materiales: Oxido de hierro.

3.- Constituyentes adversos contenidos en las materias primas para la fabricación de cemento.

- a) Carbonato de magnesio: Los depósitos calcáreos ricos en carbonato de magnesio son indeseables, puesto que un contenido de aproximadamente 5% provoca la dilatación del cemento portland.
- b) Yeso: Las vetas de yeso pueden causar una entrada alta de sulfatos, resultando en problemas de acumulación en los sistemas con proceso seco, o exceso de SO_3 .

- c) Alcalis: La presencia de exceso de álcalis (K_2O y MgO) es con frecuencia una fuente de problemas. El exceso de los mismos en el cemento resultante puede provocar la reacción entre el álcali y el agregado, y puede también disminuir la calidad del cemento. En el proceso seco, puede que sea necesario expulsar parte de los gases del horno para retirar los álcalis circulantes en exceso. Para garantizar una protección total en el cemento, para éste fenómeno el contenido de álcalis en el mismo debe quedar por abajo de 0.6%.
- d) Cloruro: Se han de evitar en el proceso seco los materiales con un alto contenido de cloruros, ya que es causa de una acumulación en el precalentador. Resulta necesaria una purga de gases si la entrada de cloruros resulta demasiado alta.
- e) Oxido fosfórico: Cierta materia prima contiene óxido fosfórico en cantidades lo suficientemente grandes como para causar dificultades en la cocción del horno y disminuir las resistencias del cemento.
- f) Sílice: Se ha de evitar en la cantera el sílice libre en la forma de inclusiones de arena,

4.- Si es demasiado bajo el contenido de óxido de calcio, la proporción de silicato tricálcico ($3CaO.SiO_2$) es insuficiente para producir una buena fortaleza temprana; si es demasiado alto, queda óxido de calcio en el clínker, que puede producir un cemento sin firmeza. El silicato cálcico... ($CaO.SiO_2$) en polvo, a causa de la dilatación que se efectúa

cuando la forma beta de dicho compuesto se convierte en la forma gama, ésta última es indeseable, porque se hidrata -- tan lentamente que no tiene ningún valor como aglutinante.

La alúmina (Al_2O_3) y el óxido férrico (Fe_2O_3), son necesarios en la fabricación, porque son los principales componentes formadores del fundente.

5.- Los cuatro principales componentes del clinker son:

- a) Silicato tricálcico: $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$, se escribe C_3S . Se le denomina frecuentemente como alita y bajo este nombre se deduce que no está puro el C_3S , pues está siendo algo modificado por la presencia en solución sólida de algunos constituyentes menores tales como MgO y Al_2O_3 .
- b) Silicato dicálcico: $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ o C_2S , referido también como belita. Hay algunas formas cristalinas de C_2S de las cuales la más usual es β - C_2S la cual es estabilizada por impurezas. La forma γ C_2S debe ser evitada hasta donde sea posible pues no tiene propiedades hidráulicas.
- c) Aluminato tricálcico: $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$, escrita C_3A no obstante que este compuesto se encuentra raramente en una cantidad mayor de 15% y usualmente se considera dentro del rango de 9 a 12%, tiene un efecto importante en las propiedades del cemento.
- d) Aluminio ferrito cálcico: se le designa comúnmente como aluminoferrito tetracálcico $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ ó C_4AF , pero puede de hecho considerarse dentro de un amplio rango de composición representada por proporciones de ferrito dicálcico (C_2F) y aluminato dicálcico (C_2A) de la cual C_4AF o $\text{C}_2\text{A}.\text{C}_2\text{F}$ es solo una combinación particular.

6.- Los componentes volátiles en el clínker son:

- a) Oxido de potasio (K_2O)
- b) Oxido de sodio (Na_2O)
- c) Trióxido de azufre (SO_3)
- d) Cloro (Cl)

7.- La relación se sílice:

$$\frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}$$

Si es alta la relación de sílice, será alta la cantidad de silicatos de calcio. Los niveles óptimos para la relación de sílice son de alrededor de 2.5. Las variaciones en el contenido de sílice tienen gran efecto en el FSC, y los cuales resultan perjudiciales para la calidad del cemento. Una parte de sílice necesita algo así como 2.8 veces su peso de cal para convertirse en C_3S .

8.- La relación alúmina/hierro:

$$\frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3}$$

Esta relación nos determina la proporción de C_3A a C_4AF . Entre mayor sea esta relación, mayor será la proporción de C_3A . Cuando se tiene una relación de 0.64 el contenido de C_3A es cero, con el C_4AF como la fase ferrita. A medida que aumenta A/F, la temperatura requerida para conseguir una determinada viscosidad del fundente, aumenta. El A/F óptimo es cerca del 1.4. Aumentando el A/F, en un FSC constante, se reducirá la cantidad de C_3S y aumentará el C_2S .

9.- El factor de saturación de cal:

$$\frac{\text{CaO} - 0.7(\text{SO}_3)}{2.8(\text{SiO}_2) + 1.2(\text{Al}_2\text{O}_3) + 0.65(\text{Fe}_2\text{O}_3)} = \text{FSC}$$

Cuando FSC = 1.0 (100%), la proporción máxima de sílice presente está potencialmente como C_3S y no hay presencia de cal libre. A medida que el FSC se hace menor que 1.0, la proporción de sílice como C_3S disminuye progresivamente y aumenta como C_2S . Por lo tanto, con un FSC constante se consigue más alita. El FSC práctico es de 90 a 95%. Y el valor máximo permisible para FSC es de 1.02 (ó 102%).

10.- Existen dos reacciones químicas de mayor importancia en el proceso de clinkerización. Estas son las de descarbonatación y la formación de la fase líquida.

- a) La descarbonatación: Es de considerable importancia debido a que más del 50% del combustible usado en un proceso térmico eficiente se utiliza para completar la reacción, requiriéndose por lo tanto, un control cuidadoso del calor entregado a la flama para obtener la máxima producción estable y una alta eficiencia.
- b) La fase líquida: Es esencial por las reacciones -- que toman lugar, siendo controlada por la composición química inicial así como por la temperatura de operación. Tiene un efecto significativo en la formación de nódulos y en la operación del horno, ya que controla la formación de forro, lo cual naturalmente tiene influencia en la vida del refractario.

11.- La función principal de un horno rotatorio es la de transferir el calor de la combustión a la alimentación y así llevar a cabo la reacción química para formar el clínker. La cantidad de calor a ser transferida y el grado de transferencia determinan la velocidad de fabricación del clínker. La cantidad de calor que tiene que ser transferida por kilogramo de clínker depende de ciertos parámetros. Existen varios factores con lo que se puede reducir el consumo de combustible como lo es la reducción de humedad en el proceso húmedo, una flama óptima, una temperatura de aire secundario lo más alta y constante posible, etc.

12.- En grado de transferencia aumenta conforme lo hacen el área efectiva del material en contacto con el gas, la diferencia de temperatura entre el gas y el material y los coeficientes de transferencia de calor en varias de las interfases. La temperatura del gas obtenida en la zona de clinkerización depende en gran parte de la temperatura del aire secundario. El grado de transferencia de calor del gas a la superficie de la carga depende de la emisividad y velocidad de los gases.

13.- En la zona de clinkerización la temperatura de calor es debida principalmente a la radiación, por lo tanto al aumentar la emisividad de la flama mejora la transferencia de calor en la zona.

14.- La transferencia debida a la convección aumenta de importancia en las zonas menos calientes y ésta se incrementará conforme la velocidad de los gases sea mayor.

15.- El grado de transferencia de calor dentro de la -

cama de material es tan importante como la transferencia -- del gas a la superficie de material, esto solo en algunas - zonas del horno. Esta transferencia dentro de la carga de material está influenciada por la profundidad del material y el grado de movimiento de la misma carga, ambos dependen de la velocidad e inclinación del horno, tamaño de partícula y la presencia de fundentes.

16.- Se ha supuesto que la transferencia de calor ha - sido el factor que controla la reacción química del mate--- rial que va dentro del horno. Pero la temperatura a la cual el material debe ser elevado para formar el clínker con una determinada cal libre, depende de la composición y naturaleza de la alimentación y la finura de dicho material.

17.- El incrementar la temperatura de la flama y el -- grado de transferencia de calor en la zona de quemado aumentará también el trabajo del refractario, eventualmente el - desgaste y la vida del refractario será una limitación para la producción.

18.- Siempre que se realice un balance térmico es im-- portante analizar los resultados en:

- a) La cantidad de calor del clínker saliendo del en--- friador, éste se puede disminuir al bajar la temperatura del clínker a la salida.
- b) Se puede disminuir la cantidad de calor en los gases de combustión aumentando la temperatura del aire secundario, esto se puede lograr regulando las persianas de los compartimientos del enfriador a lo recomendado por el fabricante, y bajando la velocidad de la mesa del enfriador, para tener más alta la cada

ma de clínker con lo que se tendrá una disminución considerable en el consumo de combustible.

- c) Se debe disminuir la entrada de aire falso en el sistema (enfriador, carátula, horno, precalentadores).

19.- El combustóleo a pesar de tener un mayor poder calorífico que el gas natural requiere una menor cantidad de aire para su combustión y produce también una menor cantidad de gases de combustión. La desventaja principal del combustóleo es su alta viscosidad lo que afecta directamente tanto su manejo como la atomización y por lo tanto afecta también la flama. El gas natural tiene menor poder calorífico y es fácil de manejar pero necesita más aire para su combustión. Por carecer de hidrocarburos pesados la flama es menos radiante disminuyendo la transferencia de calor por radiación.

20.- Como se vio, es preciso mantener un estricto control en las condiciones de operación en el horno ya que el principal renglón de gastos es precisamente el de calcinación.

CONCLUSIONES

En síntesis, se concluye que para obtener la mayor conservación de energía calorífica en la producción de clínker, los cuatro fundamentos principales son:

1.- Las tres relaciones que definen la composición qumica del clínker que son:

- a) La relación de sílice.
- b) La relación de alúmina.
- c) El factor de saturación de cal.

Al trabajar éstas tres relaciones dentro de los parámetros expuestos en los capítulos I y II, aparte de obtenerse un clínker de excelente calidad, se tiene un considerable - ahorro de energía.

2.- Durante el proceso de clinkerización, se cuenta -- con dos reacciones que dan por resultado la calidad y el -- consumo de energía calorífica, y son, a saber:

- a) La descarbonatación.
- b) La formación de la fase líquida.

De éstas dos, económicamente hablando, la que ocupa mayor importancia es la descarbonatación, ya que consume un - 50% del combustible en la fabricación de clínker.

3.- Al realizar periódicamente un balance térmico del sistema de calcinación se tiene una visión completa del comportamiento térmico del sistema. Como resultado, éste seña-la inmediatamente las anomalías dentro del sistema de calci-nación, que corrigiéndolas dan un aumento en calidad y pro-ducción del clínker, así como también la mayor conservación de energía calorífica y consecuentemente, un ahorro en energéticos.

4.- Finalmente se concluye, que conjuntamente a la operación estable del horno (sistema de calcinación) y el manejo de los parámetros físicos y químicos es como se podrá -- mantener siempre una buena conservación de la energía calorífica en la producción del clínker.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- MERMÁN BOQUE, ROBERT
La química del cemento portland.
Ed. Dossat S.A.
Madrid, 1952.

- 2.- PAPADAKIS, MICHEL y VENUAT, MICHEL
Fabricación, características y aplicaciones de los
diversos tipos de cemento,
Editores Técnicos Asociados S.A.
Barcelona, 1968.

- 3.- TAGGART, ARTHUR F.
Handbook of Mineral dressing ores and industrial
materials.
Ed. John Wiley & Sons. Inc.
New York, 1954.

- 4.- DUDA, WALTER H.
Manual tecnológico del cemento.
Editores Técnicos Asociados S.A.
Barcelona, s.a.e.

- 5.- PERRY, JOHN H. y CHILTON, CECIL H.
The Chemical Engineers Handbook 5th edition.
McGraw-Hill-Kogakusha Editors.
Tokyo, 1978.

INDICE

INTRODUCCION	1
HISTORIA DEL CEMENTO	3
CAPITULO I EL CLINKER	5
1.- Abundancia en la corteza terrestre de los elementos más importantes que constituyen al cemento portland	6
2.- Principales compuestos que constituyen al cemento portland.	8
3.- Química de la calcinación.	11
CAPITULO II PROCESO DE CLINKERIZACION. . .	24
1.- Efecto de la composición sobre los constituyentes cristalinos del clinker	25
2.- El proceso de clinkerización	26
3.- Factores que afectan la combinación. .	27
4.- Régimen de calcinación	29
5.- La fase líquida.	31
6.- Régimen de enfriamiento.	33
7.- Efecto de la mezcla cruda sobre la calidad del cemento.	33
CAPITULO III COMBUSTION, FLAMAS Y QUEMADORES	36
1.- Introducción	37
2.- Poder calorífico	37
3.- Tipos de combustibles.	38
4.- Combustión	39
5.- Flamas	42
6.- Quemadores	47
CAPITULO IV BALANCES TERMICOS.	51

1.- Introducción	52
2.- Mecanismos de transferencia de calor .	52
3.- Los factores que afectan las propiedades de la flama.	54
4.- Transferencia de calor en un precalentador de suspensión.	58
5.- Balance de calor	60
CAPITULO V CONSERVACION DE LA ENERGIA. . .	
1.- Introducción	68
2.- Régimen de calentamiento	68
3.- Efecto de los mineralizantes y constituyentes volátiles sobre la combinabilidad.	71
4.- Influencia de la composición en la calidad del cemento.	72
5.- Relación de la calidad del cemento con la estructura cristalina del clínker .	73
6.- El efecto del grado de enfriamiento sobre la estructura del clínker. . . .	74
7.- Finura del crudo	75
8.- Resumen de los incisos del 1 al 7. . .	75
9.- Combustibles	76
10.- Transferencia de calor	78
11.- Conservación y ahorro de energía . . .	80
CAPITULO VI COSTOS	
1.- Introducción	91
2.- Costos	91
3.- Costo de producción de clínker	92
ANALISIS DE RESULTADOS	
	96

CONCLUSIONES	105
BIBLIOGRAFIA	108
INICE.	110